

Fuels..Furnaces..Refractories ..

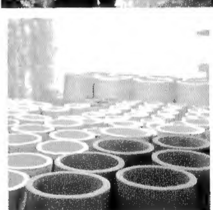
• الوقود

• الأفران

• الحراريات









مهندس استشاري

محمد أحمد خليل

SBH

• الوقود

• الأفران

• الحراريات

مهندس استشاري

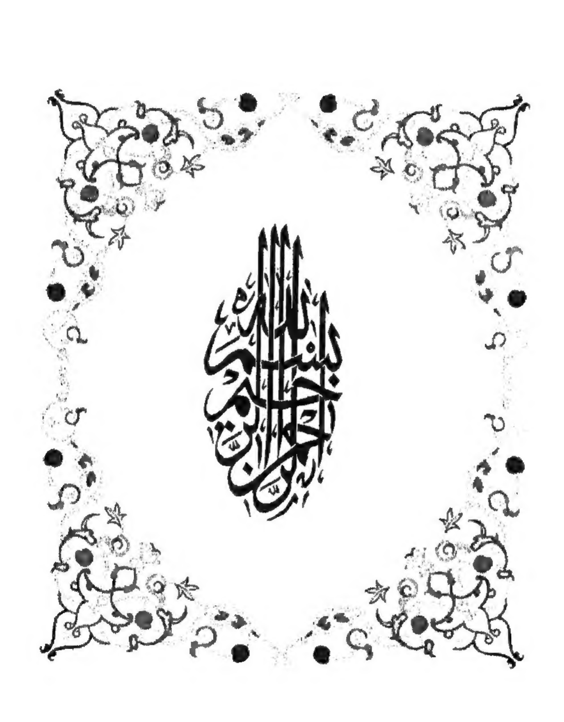
محمد احمد خليل

الكتـــــاب : الوقود – الأفران – الحراريات
المؤلـــــف : م. محمد أحمد خليل
الناشــــــر : دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع – القاهرة
المـقـــاس : ١٧ X ٢٤
عدد الصفحات : ٤٠٨
الطبعـــــة : الأولى
رقـم الإيـداع : ٢٠٠٦/٢٣١٩٤
تدمـــــك : ٩٧٧ ٢٨٧ ٦٨٦ ٨
ديـــــوى :
الاخراج الفنى وتصميم الغلاف : جمال خليفة
المـــونتـــاج الفنـــى : محمد حسنى

دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع
٥٠ شارع الشيخ ريحان – عابدين – القاهرة
☎ ٧٩٥٤٢٢٩

لمزيد من المعلومات يرجي زيارة موقعنا على الإنترنت

e-mail : sbh@link.net


بسم الله الرحمن الرحيم

تقديم

تم فى هذا الإصدار تناول موضوعات الوقود والأفران والحراريات وذلك لما لهذه الموضوعات الثلاث من أهمية بالغة فى جميع العمليات الصناعية والتنموية وخاصة فى عمليات الصناعات المعدنية والغلايات التى تجمع بين هذه الموضوعات الثلاث.

وتم اعداد هذا الإصدار فى ثلاث أبواب حيث شمل **الباب الأول على** أنواع الوقود واستخداماته الصلب والسائل والغاز وفى **الباب الثاني** تم تناول انواع الأفران المختلفة مع التركيز على عملية ترشيد الطاقة سواء بالنسبة لتصميم الأفران أو استعمالاتها أما **الباب الثالث** فقد تم فيه دراسات تفصيلية عن أنواع الحراريات من المواد الخزفية والمعدنية والغير معدنية وخصائصها واستعمالاتها . ويعتبر هذا الإصدار إضافة إلى المكتبة العربية يستفاد به فى تلك المجالات.

والله الموفق

مهندس استشارى

محمد أحمد خليل

الباب الأول



الوقود

•• محتويات الباب :

الفصل الأول

1

مقدمة عن الوقود وتقسيماته

١- عام :

المـــادة التـــي تنتج حرارة تسمى وقود. الحرارة يمكن إنتاجها إما بالحرق أو بالانـــشطار أو الانـــدماج النووي (Nuclear Fission and Fusion). الحرارة الناتجة عن احتـــراق الوقـــود تستخدم إما مباشرة أو أن يتم تحويلها إلى طاقة ميكانيكية أو طاقة كهربائية. الوقود هو المصدر الرئيسي للطاقة في الصناعة.

ينقسم الوقود إلى أربع أنواع رئيسية وهي:

الوقود الحفري (Fossil)، ناتج العمليات (By Products)، الكيماوي، النووي ب الـــثلاث الأولـــى تنتج الحرارة بالحرق في وجود الهواء أو الأكسجين. الوقود النووي يطلق حرارة بالانشطار النووي أو الاندماج النووي وذلك بتحويل الكتلة إلى طاقة.

الوقـــود الحفـــري هـــو المنتج من بقايا الحفريات للنبات والحيوان ويوجد في القشرة الأرضية مثل الفحم، البترول والغاز الطبيعي. الخ. وقود ناتج العمليات هو الناتج عن بعض العمليات الصناعية ولكن بشكل ثانوي. مثل غاز فرن الكوك وغاز الفرن العالي وهذه غازات ناتجة في عملية الكوك وعملية صناعة الحديد. الوقود الكيميائي له طبيعة

غــريبة وعادة لا يستخدم في العمليات التقليدية. مثل الهيدرازين (Hydrazine – وهو وقود الصواريخ) وكذلك نترات الأمونيا، الفلورين...الخ.

الوقـــود النووي المنتج للحرارة بالانشطار هو اليورانيو والبلوتونيوم ...الخ والمنتج للحرارة بالاندماج هو الديتريوم والتريتيوم (Deuterium and Tritium) وكلاهما من نظائر الهيدروجين (Isotopes of H2) ....الخ. وفي كلا الحالتين تتحول المادة إلى طاقـــة. وطـــبقا لحالة الاستخدام فإن الوقود ينقسم إلى الوقود الأولي والوقود الثانوي. الوقـــود الأولـــي هو ذلك الذي يوجد في الطبيعة مثل الفحم، الخشب، البترول، الغاز الطبيعي....الخ. الوقود الثانوي هو الذي يتم إنتاجه من الوقود الأولي مثل الكيروسين المنتج من البترول وغاز فرن الكوك الذي ينتج من الفحم....الخ.

الوقود الثنائي ينقسم إلى الوقود المصنع أو كمنتج ثانوي (By Product). الوقود المـــصنع هـــو الـــذي ينـــتج لغرض معين مثل الكوك (لصناعة الحديد)، الجازولين (لمحـــركات الاحتـــراق الداخلـــي)، الغاز المنتج (Producer Gas) والذي يستخدم في التسخين الصناعي...الخ. الوقود كمنتج ثانوي هو ذلك المنتج المصاحب الذي لا يمكن تجنـــبه في عملية التصنيع المنتظمة مثل، غاز تكرير البترول، لباب قصب السكر بعد عصره (Bagasse)، القار...الخ. وقود المنتج الثانوي أو الإضافي يساعد الصناعة في المحافظة على الوقود الأولي.

الجدول الآتي يوفر بيان بتقسيم الوقود (باستثناء الوقود الكيماوي والنووي)

تقسيمات الوقود:

التقسيم العام	وقود أولي	وقود ثنائي	
	طبيعي	مصنع	منتج ثانوي
الصلب	خشب فحم	الكوك فحم نباتي أو حيوان (Charcoal) الفحم المطحون	مخلفات الخشب مخلفات القصب حبيبات الكوك مخلفات الحبوب

التقسيم العام	وقود أولي	وقود ثانوي	
			الفحم النباتي أو الحيواني
السائل	زيت البترول	بنزين السيارات فازلين كحول وقود غروي سولار نافتا زيت نباتي	القار مخلفات ماكينة تصنيع لب الورق
الغاز	الغاز الطبيعي	الغاز المنتج غاز الماء غاز الماء المكربن غاز الفحم الحجري (Coal Gas) غاز الزيت غاز جوبار الغاز الطبيعي المعدل البيوتين البروبين الأسيتيلين الهيدروجين	غاز الفرن العالي غاز الفرن العالي غاز فرن الكوك غاز تكرير البترول غاز مخلفات الصرف الصحي

الوقود النووي من نوعين: أحد النوعين يمكن أن يطلق حرارة عند انشطاره بتصادم نيترون. هذا الوقود يسمى الوقود الانشطاري (Fissel Fuel) مثل اليورانيوم ٢٣٣ ، اليورانيوم ٢٣٥، البلوتونيوم ٢٣٩. يوجد بعض من الوقود النووي مثل الثوريوم ٢٣٢، اليورانيوم ٢٣٨ والتي لا يمكن أن تنشطر مباشرة، ولكن يمكن تحويلها إلى مادة انشطارية مثل اليورانيوم ٢٣٣ والبلوتونيوم ٢٣٩. مثل هذا الوقود

النووي يسمى الوقود المخصب (Fertile). ما زال هناك نوع آخر من الوقود النووي الذي يطلق الحرارة بالاندماج (By Fusion) مثل الديتريوم (Deuterium) والترتيوم (Tritium) وكلاهما من النظائر المشعة للهيدروجين، والهيدروجين....الخ. ولكن في كلا الحالتين ما إذا كان الوقود سيحدث له انشطار أو اندماج فإنه يحدث تحول الكتلة إلى طاقة حيث تنطلق الحرارة.

طبقا للاستخدام، فإن الوقود ينقسم إلى وقود منزلي، ووقود إضاءة، ووقود صناعة، ووقود الصاروخ...الخ.

الوقود المنزلي يوفر الحرارة لإعداد الطعام والتدفئة. وقود الإضاءة مثل الكيروسين يوفر الضوء في الظلام....الخ الوقود الصناعي يوفر الحرارة لتسخين العمليات الصناعية، وتوليد البخار والكهرباء...الخ. وقود الصاروخ مثل الهيدرازين يستخدم في إنتاج الدفع العالي لقذف الصاروخ. وبالنسبة لتقسيم آخر، فإن الوقود المنتج للحرارة بالحرق يسمى الوقود الكيميائي والمنتج للحرارة بالانشطار أو الاندماج النووي يسمى الوقود النووي.

٢- الأساسيات والتعاريف ووحدات التحويل:

يلزم التعرف على المصطلحات الأولية لدراسة هذا الموضوع طبقا للآتي:

رتبة الفحم: هذا يعني نضج الفحم (Maturity). الفحم يتكون من مادة نباتية التي تحولت إلى الفحم خلال مراحل مختلفة من النضج والتي تسمى الخشب الصخري أو فحم المستنقعات (Peat)، الفحم البني (Lignite)، القاري أو البيتوميني (Bituminous)، الأنثراثيت وهو الفحم الصلب أعلى رتب الفحم الأدنى في النضج ولذلك يكون في أدنى درجة. بينما يكون فحم الأنثرا ثيت يدل على درجة نضجه أو درجة تحوله.

التفحم أو التحول: (Coalification, or Metamorphism):

وهي عملية تحول اللجنيت (الفحم البني) إلى فحم الأنثراسيت (الفحم النقي).

كربنة الفحم: (Carbonisation of Coal): تسخين الفحم في معزل عن الهواء عند درجة

حرارة عالية لإنتاج الكوك، القار والغاز يسمى كربنة الفحم.

الفحم الكوكي وفحم الكوك:

عند كربنة مسحوق الفحم (أي تسخينه بمعزل عن الهواء) فإنه يكون كتلة متمددة في بعض الحالات. مثل هذا الفحم يسمى الفحم الكوكي (Caking – أي الذي يتحول إلى كوك). وعندما يكون المتبقي شديد الصلابة والقوة فإنه يسمى الكوك وتسمى العملية التكويك (Coking). يسمى الفحم فحم الكوك. كل أنواع الفحم الكوكي لا تكون متبقي صلب وقوي وملتصق من الكوك. لذلك فإن كل الفحم الكوكي ليس بالضروري فحم تكويك ولكن كل فحم التكويك يجب أن يكون بالضرورة كوكي بطبيعته.

عند كربنة الفحم فإن الفحم الكوكي يبدأ في التمدد ثم الانكماش قليلا تاركا متبقي أضخم وأضعف ومسامي. عند كربنة الفحم الكوكي فإنه يتمدد أولا ثم ينكمش إلى درجة كبيرة (أكثر من مجرد فحم كوكي) ليكون متبقي قوي ومدمج وأقل نفاذية نسبيا. عملية الفحم الكوكي (Caking) يقابلها معدل للتسخين البطيء بينما التكويك (Coking) يقابلها معدل أسرع في التسخين. كل فحم التكويك هو أساسا فحم بتيوميني أو قاري. الفحم الكوكي القوي يسمى فحم الكوك.

الفحم الغير كوكي أو الفحم الغير مكوك: (Non-caking/ Non-coking coals)

هذا الفحم الذي لا ينصهر يكون كتلة غير منتظمة (Lumpy) ومتبقي متلامس / مدمج وفحم غير مكوك / غير كوكي.

قواعد تقرير تحليل الفحم: تستخدم القواعد التالية:

١. الفحم الخام المنتج من منجم الفحم يسمى (Run-of-Minecoal). ولا يتم له معالجة مثل خفض الحجم، التخلص من الرطوبة...الخ.

٢. عند استلام الفحم من المنتج بواسطة المستهلك يتم عندئذ تحليله مع تسجيل الخواص الأخرى بعد استلامه. أثناء نقل الفحم من المنتج إلى المستهلك يحدث

كثيرا من التغيرات الطبيعية والكيميائية وكذلك عند تشغيله مثل خفض الحجم، الغسيل، التعرية...الخ. لذلك فإنه عند المستخدم يتم تسجيله على أساس الاستلام (As-received basis).

٣. التجفيف الهوائي: الفحم حديث ا لخروج من المنجم يأخذ هواء ويجف لتعرضه للشمس أثناء النقل لذلك فإن محتواة من الرطوبة يتغير طبقا لدرجة حرارة ورطوبة الجو. في الحقيقة فإن البيانات على أساس الاستلام وعلى أساس الجفاف قد تكون متساوية لأن الفحم يفقد رطوبته بسبب التعرض للهواء الجوي أثناء النقل والتخزين.

ولذلك للحصول على نتائج دقيقة وقابلة للمقارنة فإن الفحم يتم تعريضه إلى جو صناعي وقياسي ٤٠ °م، ٦٠ % رطوبة نسبية للحصول على بيانات الجفاف الهوائي. حتى بعد الجفاف الهوائي فإن الفحم يحتوي على بعض الرطوبة.

٤. الفحم الجاف: عند التخلص تماما من تأثير الرطوبة على البيانات التحليلية عندئذ فإن تحليل الفحم يسجل على أساس الجفاف التام (Dry Basis).

٥. الخلو من الرماد عند الجفاف: تأثير الرماد والرطوبة في الفحم يتم إيجاده بتسجيل البيان على أساس التخلص من الرماد الجاف هذا البيان مناسب لمقارنة الفحم النقي بالفحم ذو المحتوى المنخفض من الرماد أي أقل من١٠%.

٦. الخلو من المواد المعدنية عند الجفاف: في حالة الفحم ذو المحتوى العالي من الرماد (أكثر من ١٠%)، فإن محتوى الفحم من المواد المعدنية يكون حوالي ١٠% أكثر من المحتوى من المراد. بينما في حالة المحتوى المنخفض من الرماد فإن المواد المعدنية يمكن اعتبارها أنها تساوي المحتوى من الرماد. لذلك، فإنه بالنسبة للفحم ذو المحتوى العالي من الرماد، فإن مقارنة الفحم النقي يمكن عملها في حالة تسجيل تحاليلها على أساس الجفاف – الخلو من المواد المعدنية بدلا من على أساس الجفاف والخلو من الرماد.

٧. الخلو من المواد المعدنية: يمكن إبعاد تأثير المواد المعدنية الموجودة في الفحم بتسجيل البيانات على أساس الخلو من المواد المعدنية – وهي تشمل الرطوبة في الفحم.

التحليل التقريبي للفحم:

التحلـيل التقريبـــي يعني إيجاد نسبة الرطوبة، والمواد المتطايرة، والكربون المثــبت والرماد بالوزن. هاذ التحليل يعطي النسب التقريبية للمكونات الرئيسية للفحم ويفيد في إقرار استخدامه لغرض معين.

التحليل الكلي للفحم:

التحلـيل الكلـــي يعنـــي تعيين النسبة المئوية بالوزن للكربون، الهيدروجين، النيتروجين، الأكسجين، الكبريت للفحم النقي الخالي من الرطوبة ومن المواد المعدنية. هـــذا التحلـيل يعـــين المكـــونات الأولية للفحم ويفيد في تصميم معدات حرق الفحم والمهمات المساعدة.

الاحتــراق: وهـــو تفاعل كيميائي منتج للحرارة نتيجة تفاعل الوقود مع الأكسجين أو الهواء عند درجات الحرارة العالية لتوليد حرارة.

القيمة الحرارية (السعرية) لوحدة الوقود: (Calorific Value)

كمـــية الحرارة هذه (كيلو كالوري) الناتجة عن احتراق وحدة كمية من الوقود تسمى القيمة الحرارية. وحدة القيمة الحرارية هي الكيلو كالوري لكل كجرام (Kcal/Kg) للوقـــود الصلب أو السائل وكيلو كالوري على Nm3 للوقود الغازي. Nm3 تعني حجم الغـــاز بالمتـــر المكعب عند درجة الحرارة العادية والضغط العادي والذي هو صفر درجـــة مـــئوية، ٧٦٠ مليمتر زئبق. نظرا لأن أحجام الغازات تتغير بالنسبة للضغط (طبقا قانون بويل) ودرجة الحرارة (طبقا لقانون شارل) لذلك فإن حجمه يعبر عنه عند درجة الحرارة والضغط العادي (NTP) لتوفير قياس معياري.

القيمة الحرارية الكلية: (Gross Calorific Value)

عـند ضغط ثابت يتضمن أن الحرق يحدث عند ضغط ثابت وليس عند حجم ثابـت. فـي التعيينات المعملية، فإنه يتم حرق الوقود الصلب والسائل عند حجم ثابت والوقـود الغـازي يحرق عند ضغط ثابت. ولكن في حالة الأفران يحدث الحرق عند ضغط ثابت. الفرق في القيمتين المتقابلتين صغير. بالنسبة للفحم، القيمة الحرارية عند ضـغط ثابـت يزيد عن القيمة الحرارية عند حجم ثابت بحوالي ٥,٥ كيلو كالوري/ الكيلوجرام.

القـيمة الحـرارية الـصافية أو أدنى قيمة تسخين عند حجم ثابت هي كمية الحرارة المنتجة عند حرق وحدة كمية من الوقود عند حجم ثابت في الأكسجين المشبع ببخار الماء، المواد الأصلية والمنتجات النهائية للحريق عند درجة حراريـة قياسيـة (٢٥ °م) والماء المنتج من الوقود الذي يكون في حالة بخار. القيمة الحرارية الصافية لـذلك تكون أقل عن القيمة الحرارية الكلية بالكمية المقابلة إلى حرارة التكثيف لبخار المـاء، والذي هو ٢٥ °م هو ٥٨٣,٥ كيلو كالوري/ كجرام من الماء. على أساس أن هيدروجين الماء الذي يساوي ٥,٢٥٢ كيلو كالوري على الكيلو جرام أو ٤٦٨,٩ كيلو كالوري/ حجم الهيدروجين (Nm3).

تـستخدم المعادلة الآتية في حساب القيمة الحرارية الصافية من القيمة الحرارية الكلية للوقود الصلب والسائل تقريبا.

$$CN = CG - 53H$$

حيث:

CN ، Co = القـيمة الحـرارية الصافية والكلية بالكيلو كالوري على الكيلو جرام على التوالي.

H = نسبة الهيدروجين للفحم، بما فيه هيدروجين الرطوبة وماء تميؤ المواد المعدنية.

في حالة الوقود الغازي، تستخدم المعادلة الآتية:

$$CN = CG - 4.7\ V$$

حيث:

CN ، CG = القيم الصافية والكلية بالكيلو كالوري / Nm3 (أي حجم الغاز بالمتر المكعب) على التوالي.

V = نسبة الحجم (مقيم كهيدروجين) للهيدروجين الكلي للوقود الغازي، بما فيه الهيدروجين المنتج من مكونات حرق أخرى.

القيمة الحرارية الصافية عند ضغط ثابت تتضمن أن الحرق حدث عند ضغط ثابت وليس عند حجم ثابت.

الغاز العادم: (Flue Gas)

الغاز العادم هو المنتجات الغازية الناتجة عن حرق الوقود.

غاز الوقود: (Fuel Gas)

كل غازات الوقود التي تحرق لتسخين الأفران، والتي عند حرقها تنتج الغازات العادمة.

السعة الحرارية والحرارة النوعية: (Thermal Capacity, Specific Heat)

السعة الحرارية للمادة تعرف بكمية الحرارة (Kcal) اللازمة لرفع درجة الحرارة لوحدة الوزن (كيلو جرام) لمادة بدرجة مئوية واحدة (١ °م) مثلا من ١٥ °م إلى ١٦ °م.

الحرارة النوعية (Specific Heat) لمادة هي النسبة بين السعة الحرارية لتلك المادة إلى السعة الحرارية للماء. الحرارة النوعية هي رقم. الحرارة النوعية للماء هي ١ °م عند ١٥,٥ °م.

الحرارة النوعية للألومنيوم (عند صفر إلى ١٠٠ °م) هي ٠,٢٢٦ هذا يعني أنه إذا أخذت عدد معين من الكيلو كالوري لتسخين عدد معين من الكيلو جرامات من الماء بعدد معين من درجات الحرارة (°م)، فإنها سوف تأخذ فقط أضعاف ٠,٢٢٦ من الكيلو كالوري لتسخين نفس العدد من الكيلو جرامات من الألومنيوم بنفس رقم درجات

الحرارة °م.

كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة الحرارة لكتل متساوية من مواد مختلفة إلى نفس المستوى من درجة الحرارة تختلف ذلك لأن السعة الحرارية لكل منهم تختلف عن الآخر.

السعة الحرارية تزداد بزيادة درجة الحرارة للمادة "متوسط السعة الحرارية "Mean Specific Heat" . هي القيمة المتوسطة للسعة الحرارية بين مستويين مختلفين من درجة الحرارة.

بالنسبة للغازات، توجد قيمتين للسعات الحرارية وهي الحرارة النوعية عند الضغط الثابت(Cp) والحرارة النوعية عند الحجم الثابت (CV). يوجد اختلاف بين هاتين القيمتين (CP > CV) بسبب المكافئ الحراري لعمل التمدد بسبب الزيادة في الحجم الناتجة عن ارتفاع درجة الحرارة.

المحتوى الحراري: (Heat Content)

هي الحرارة التي تحتويها المادة عند درجة حرارة معينة أعلى من درجة حرارة ثابتة (مقياس). يتم حسابها بضرب وزن المادة بمتوسط الحرارة النوعية في الفرق في درجات الحرارة.

قانون بويل: (Boyle's Law)

حجم كمية معينة من الغاز عند درجة حرارة ثابتة يتغير عكسيا طبقا للضغط الكلي أي:

$P \alpha I / V \qquad P1V1 = P2V2$

كيلو مول (أو كيلو جزيئي):

الكيلو مول هي تلك الكمية التي وزنها بالكيلو جرام هو نفس الرقم للوزن الجزيئي للمادة.

كيلو مول (كيلو جزيئي) = وزن المادة بالكيلو جرام / الوزن الجزيئي للمادة.

قانون دالتون للضغط الجزئي: (Partial Pressure)

الـــضغط الكلي لأي خليط من الغازات يساوي مجموع ضغط كل مكون (يسمى الـــضغط الجزئي). الضغط الجزئي لكل مكون يتناسب طبقا لتركيزه في الخليط الغازي.

الغاز المشبع:

فـــي خلـــيط لبخار الماء وأي غاز آخر كل ينتج ضغط يتناسب مع نسبته بالحجم ونظـــرا لأن الماء له ضغط بخار محدد (Definite Vapour Pressure) عند درجات الحـــرارة المختلفة، فإن تركيز بخار الماء في الغاز يكون محدودا. عند الوصول إلى هذا الحد لبخار الماء فإن الغاز يسمى المشبع.

نقطة الندى للغاز: (Dew Point of Gas)

في الغاز المشبع أي انخفاض في درجة الحرارة (عند ضغط معين) يسبب تكثف (Condensation) أو تكـــوين الـــندى من بخار الماء الموجود فيه . درجة الحرارة التي عندها يظهر أن نقطة لتكثف الماء هي نقطة الندا للغاز. في الواقع، التكثيف يمكن أن يحدث بزيادة الضغط كذلك.

رطوبة الغاز: Humidity of the Gas

كمية الماء الموجودة في الغاز ترتبط برطوبة الغاز. الغاز الذي يكون مشبعا تماما بـــبخار الماء له رطوبة ١٠٠%. إذا كان فقط متشبع بنسبة ٥٠%، فإن رطوبته هي ٥٠%.

درجة حرارة الاشتعال: (Ignition Temperature)

هـــي أدنى درجة حرارة التي عندها يشتعل الوقود (يلتهب) في جو مؤكسد بدون أي مصدر لهب خارجي.

نقطة الوميض: (Flash Point)

نقطة الوميض هي أدنى درجة حرارة التي عندها ينتج بخار الوقود السائل شعلة

لهب لحظية عند التعرض إلى اللهب.

نقطة الحريق: (Fire Point)

نقطة الحريق (اللهب) هي أدنى درجة حرارة التي عندها ينتج بخار الوقود السائل لهـب مستمر عند التعرض إلى لهب بدلا من اللهب اللحظي. نقطة الحرق أعلى من نقطة الوميض.

التكسير:(Cracking)

تكـسير الجـزئيات الكبيرة للوقود إلى جزئيات أصغر باستخدام الحرارة يسمى التكسير.

تحليل أورسات: (Orsat Analysis)

تعيين نسبة ثاني أكسيد الكربون، أول أكسيد الكربون، الأكسجين، النيتروجين في الغاز العادم باستخدام جهاز أورسات يسمى تحليل أورسات.

درجة حرارة اللهب النظرية:

درجـة حـرارة اللهب النظرية هي درجة الحرارة التي يتم الحصول عليها من نـاتج احتراق الوقود عندما لا يكون هناك فقد في الحرارة إلى المجال المحيط. درجة حرارة اللهب العالي للوقود، تكون أفضل لأنها توفر كفاءة حرارية أعلى.

رقم الأوكتين: (Octane No.)

رقـم الأوكتـين هو معدل عدم حدوث الخبط (Antiknock Rating) للجازولين (وقـود السيارات). وهو يساوي نسبة حجم مادة الأيزوأوكتين (Iso-Octane) في خليط من الأيزوأوكتين، إن-هيبتين (N-heptane) والذي يعطي نفس الخبط (knocking) مثل الجازولـين تحت الاختبار عند الحرق في محرك لاختبار قياسي. كلما زاد رقم الأكتين كلما كان الجازولين أفضل.

رقم السيتين: (Cetane Number)

رقـم السيتين يبين نوع الحرق ومعدل عدم الخبط لوقود الديزل. وهو النسبة

بـــالحجم للأوكتـــيـــــــن فــــي خليــــط من الأوكتـــــين والألفا ميثيـــل نفتاليـــــن (Alpha-Methyl Naphthatalene) والــــذي يعطـــي نفس تأخير الحرق مثل الديزل تحت الاختبار عند الحرق وهو المعيار القياسي لمحرك الديزل في الظروف القياسية.

كلما زاد رقم السَتين للديزل كان الديزل أفضل.

نقطة الصب: (Pour Point)

نقطة الصب هي أدنى درجة حرارة التي عندها زيت الوقود يتم صبه أو تدفقه عـــند التبريد تحت ظروف خاصة. في حالة زيادة التبريد للوقود أقل من نقطة الصب فإنــــه لا يـــتدفق ويحدث له تجمد. هاذ هام إذا كان الوقود السائل يتم تداوله في المناخ البارد أو عند ارتفاعات عالية.

٣- الوحدات الحرارية

(أ) السعر الحراري أو جرام سعر حراري:

Calorie (cal) Orgrm calorie .gcal)

لكـــل الأغـــراض العملـــية، السعر الحراري أو الجرام الحراري يمكن تعريفه بكمية الحرارة اللازمة لرفع درجات الحرارة لجرام واحد من المـــاء درجة مئـــوية واحـــدة (١ °م) وتحديدا من ١٥ °م إلى ١٦ °م.

١ سعر حراري = ٤,١٨٥ جول = ٤,١٨٥ X ١٠ ^٧^ إرج

(ب) الكيلو سعر حراري (الكيلو كالوري):

١ كيلو كالوري (كيلو سعر حراري) = ١٠٠٠ سعر حراري

(جـ) الوحدة الحرارية البريطانية: (British Thermal Unit)

(BTU) هي كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة رطل من الماء درجة واحدة فهرنهيت وتحديدا من ٦٠ ° فهرنهيت إلى ٦١ ° فهرنهيت.

I (BTU) = ١,٠٥٤,٦ جول = ١,٠٥٤,٦ X ١٠ ^٧^ إرج.

التحويل للوحدات الحرارية المختلفة:

الوحدات الحرارية يمكن تحوليها على أساس ١ كيلوجرام = ٢,٢ رطل،

١ °م = ١,٨ ° فهرنهيت. وبذلك

١ كيلو كالوري (كيلو سعر حراري) = ١٠٠٠ سعر حراري =

= ٣,٩٦٨ وحدة حرارة بريطانية.

١ وحدة حرارة بريطانية = ٢٥٢ سعر حراري

١٠٠,٠٠٠ وحدة حرارة بريطانية (BTU) = ١ ثيرم (I Therm)

= ١٠٥,٥ ميجا جول.

١ سعر حراري الجرام = كيلو سعر حراري/ الكيلو جرام = ١,٨ وحدة حرارة بريطانية.

١ كيلو سعر حراري / م^{٣} = ٠,١٠٧٧ وحدة حرارية بريطانية /قدم مكعب.

١ وحدة حرارية بريطانية/ قدم مكعب = ٩,٣ كيلو سعر حراري/ م^{٣}.

عند احتراق الوقود المحتوي على الهيدروجين، فإن الهيدروجين الموجود يحدث له احتراق ويتحول إلى بخار. عند تبريد نواتج الحريق إلى درجة حرارة الغرفة، فإن البخار يحدث له تكثف ويتحول إلى ماء عندئذ تنطلق الحرارة الكامنة (Latent Heat). لذلك فإن الحرارة الكامنة لتكثف البخار التي تنطلق تكون ضمن القيمة الحرارية الكلية.

تعيين القيمة الحرارية بواسطة قنبلة القياس الحراري (Bomb Calorimeter) يعطي القيمة الحرارية الكلية أو العليا.

القيمة الحرارية الصافية أو القيمة الحرارية المنخفضة هي صافي الحرارة الناتجة عند الحرق الكامل لوحدة الوقود ثم السماح لنواتج الحريق بالصرف.

لذلك

القيمة الحرارية الصافية أو المنخفضة = القيمة الحرارية الكلية – حرارة التكثيف الكامنة لبخار الماء المنتج.

= القيمة الحرارية الكلية – (كتلة الهيدروجين لوحدة الوزن من الوقود المحترق X ٩ X الحرارة الكامنة لتبخر الماء).

واحد جزء بالوزن من الهيدروجين يعطي ٩ أجزاء بالوزن من الماء كالآتي:

$H2 + O \rightarrow H2O$

2g   16g → 18g

1g   8g   9g

الحرارة الكامنة للبخار هي ٥٨٧ سعر حراري (أو كيلو كالوري/ الكيلو جرام أو ١٠٦٠ وحدة حرارية بريطانية/ الرطل من البخار المنتج).

الطاقة الحرارية الصافية (Net. C.v.) = الطاقة الحرارية الكلية (Gross c.v) –

٩ X H/١٠٠ X٥٨٧ = الطاقة الحرارية الكلية – ٠,٠٩ X H X ٥٨٧

حيث H = النسبة المئوية للهيدروجين في الوقود.

الطاقة الحرارية عند الضغط الثابت:

الطاقة الحرارية عند الضغط الثابت $Q_{c.p.}$ يمكن حسابها على أساس المعادلة التالية:

$$Q_{c.p.} = Q_{c.v.} - (\Delta_n).R.T.$$

حيث:

$Q_{c.v.}$ = القيمة الحرارية عند ثبات الحجم (الذي يتم تعيينه بقنبلة القياس الحراري)

Δ_n = الزيادة في الجزيئات الغازية بعد التفاعل.

R = ثابت الغاز Gas constant

T = درجة الحرارة المطلقة.

إذا كان هناك خفض في عدد الجزيئات الغازية المتكونة بعد التفاعل، عندئذ Δ_n سوف يكون لها قيمة سالبة وبالتالي $Q_{c.p.}$ ستكون أعلى من $Q_{c.v.}$.

كثافة الطاقة الحرارية ودرجة حرارة اللهب :

(Calorific Intensity and Flame Temp)

عند احتراق الوقود بدون لهب يمكن تقديره أو إدراكه، فإن كل الحرارة الناتجة عن الحرق تكون مركزة في مساحة صغيرة نسبيا. في هذه الظروف، فإن الوقود الصلب الذي يحترق بسرعة ينتج عنه درجة حرارة عالية في شكل طبقة محلية. عندئذ يقال أن الوقود يحترق بطاقة حرارية ذات كثافة عالية.

أثناء حرق الوقود (الصلب، السائل أو الغاز) المحتوي على كميات غير مقدرة من المواد المتطايرة فإن اللهب ينتج غالبا بشكل ثابت. عندئذ فإن كل الحرارة المنتجة بواسطة الوقود يتم انطلاقها على كل مساحة حرق الكتلة وزيادة مساحة اللهب يقابلها تركيز أقل للحرارة. لذلك، يمكن القول أن الوقود المحترق مع وجود لهب (Flaming) يحترق بكثافة طاقة حرارية أقل عن الوقود الذي يحترق بدون لهب (Flameless).

درجة حرارة اللهب تمثل أقصى درجة حرارة التي يمكن أن يصل إليها تسخين الغرض بواسطة اللهب. زيادة على ذلك، فإن معدل التسخين للغرض يزداد بزيادة الفرق في درجة الحرارة بين اللهب والغرض. درجة حرارة اللهب تعتمد أساسا على القيمة الحرارية للغاز وكميات إجمالي المنتجات الغازية المتكونة والحرارة النوعية لكل منها. ولكن، درجة حرارة اللهب التي حسبت بمفردها من الاعتبارات السابقة تكون أعلى بشكل ثابت للأسباب التالية:

١. الحرق لا يتم تماما وفورا.
٢. بعض الحرارة المنتجة تفقد في الوسط المحيط بالإشعاع.
٣. بعض الحرارة يفقد كطاقة حرارية كامنة لازمة للبخار المنتج.
٤. قليل من الحرارة يمكن امتصاصه بتحلل جزئيات الغاز.
٥. الحرارة النوعية للغازات تزداد مع درجة الحرارة والبيان المتعلق بالحرارات النوعية عند درجات الحرارة العالية يكون غير متاح تماما.

ولكـــن، درجـــات حـــرارة اللهب الحقيقية لمختلف وقود الغازات سيكون بنفس القدر لـــدرجات حرارة اللهب لهذا والغازات بالتالي ولذلك يمكن استخدامها لمقارنة مختلف الوقود. درجة حرارة اللهب النظرية يمكن حسابها بالمعادلة التالية:

$$\text{درجة حرارة اللهب النظرية} = \frac{\text{(درجة حرارة الاحتراق+الحرارة المحسوسة في الوقود والهواء)}}{\text{(كمية نواتج الحريق)}\times\text{(متوسط حرارتهم النوعية)}}$$

المرونة و التحكم: (Flexibility and control)

رغـــم أن القـــيمة الحرارية هي العامل الرئيسي في تعيين أثمان الوقود، إلا أن بعض العـــوامل الأخـــرى يجب أن تؤخذ في الاعتبار كذلك. الوقود الذي يسهل حرقه، الذي يمكن حرقه بمعدلات مختلفة بحيث يكون تولد الحرارة بطيء أو سريع طبقا للمطلوب، والذي يمكن تداوله والتحكم فيه بسهولة أو تجميعه (في المحرك مثلا)، والذي يكون له مرونة أكبر يثبت أنه أفضل من الوقود الذي له قيمة حرارية عالية ولكن مرونته أقل. المـــرونة يمكن اعتبارها الاستجابة لانطلاق الحرارة مع التغير في ظروف العمل مثل الوقود أو الإمداد بالهواء.

٤- تعيين القيـمة الحرارية للوقود الصلب والوقود السائل الغير متطايرة: شكل (١/١)

قنبلة مقياس الحرارة أ، المسعر التفجيري (Bomb Caloremeter)

القـــيمة الحـــرارية للوقـــود الصلب أو الوقود السائل الغير متطاير يمكن تعيينها باستخدام المسعر التفجيري بالضغط العالي للأكسجين شكل (١/) والذي يتكون من :

١. قنـــبلة اســـطوانية قوية مصنوعة من صلب الأوستينيت المثبت المقاوم للتآكل والتي تكون قادرة على تحمل ضغط لا يقل عن ٥٠ جوي.

يـــتم تجهيز القنبلة بغطاء لولبي محكم ضد تسرب الغاز ومثبت به أقطاب من الصلب المقـــاوم و محـــبس تصريـــف. أحد هذه الأقطاب أنبوبي والذي يعمل في نفس الوقت كمدخل للأكسجين. ملتصق بهذا القطب حلقة صغيرة تعمل كحامل للبوتقة.

٢. وعاء نحاسي للقياس الحراري الذي ترتكز عليه القنبلة أثناء الاختبار.
٣. غلاف خارجي مقفل لحجز الماء.
٤. خلاط لتقليب الماء في جهاز قياس الحرارة بمعدل ثابت.
٥. ترمومتر مدرج بترقيم جزء من ١٠٠ درجة مئوية. المستخدم عادة هو الترمومترات ثابتة الصفر أو الترمومترات من نوع (Beckman).
٦. مهمات أخرى ضرورية لضغط الفحم إلى حبيبات، وملئ القنبلة بالأكسجين...الخ.

الطريقة:

١. حوالي ½ إلى ١ جرام من الفحم المطحون الناعم الذي تم تجفيفه في الهواء (يفضل المضغوط في شكل حبيبات) يتم وزنه بدقة في بوتقة جهاز قياس السعر الحراري. (Calorimeter)
٢. قطعة من سلك البلاتين الدقيق (سمك ٠,٠٠٧٥ سم) يتم شدها عبر قطع القطب للقنبلة ثم يتم ربط أحد نهايات خيط القطن (المستخدم في الحياكة) حول السلك. يتم وضع البوتقة في مكانها وينظم الطرف الآخر للخيط بحيث يكون ملتصقا بالفحم. وبالتبادل، يستخدم سلك أطول من البلاتين، ثم يتم ثنيه بحيث يمكنه أن يلمس حبيبة الفحم.
٣. يتم إدخال حوالي ١٠سم^{3} من الماء المقطر في القنبلة لامتصاص أبخرة أحماض الكبريتيك والنيتريك المتكونة أثناء الحرق ثم يتم قفل غطاء القنبلة.
٤. يتم ملء القنبلة بالأكسجين حتى ضغط ٢٥ جوي وأسلاك الحرق يتم ربطها عند الأطراف.
٥. يتم وزن وعاء مقياس السعر الحراري، يتم وزن الماء الكافي بما يكفي لغمر غطاء القنبلة.

يتم عندئذ وضع وعاء مقياس السعر الحراري في الغلاف الخارجي على قدمة عازلة مجهزة. يتم خفض القنبلة في مقياس السعر الحراري (Calorimeter). يتم وضع

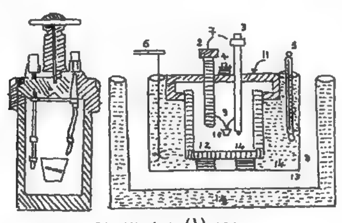
الخلاط وغطاء وعاء مقياس السعر الحراري في مكانهم وضبط ترمتر "بكمان".

٦. يبدأ تشغيل الخلاط.

٧. بعد خمسة دقائق يتم ملاحظة درجة حرارة الماء إلى أقرب ٠,٠٠٢ °م وأخذ خمسة قراءات أخرى كل بفاصل دقيقة واحدة.

٨. عند نهاية الدقيقة الخامسة، يتم توصيل الأقطاب ببطارية ٦ – ١٢ فولت لحرق الشحنة مع استمرار القراءات بعد كل دقيقة. بعد الوصول إلى أقصى درجة حرارة ، تستمر القراءات حتى ينتظم معدل الهبوط.

٩. يتم إيقاف الخلاط وسحب القنبلة من مقياس السعر الحراري. بعد فترة حوالي نصف ساعة لترسيب ضباب الحامض خلال القنبلة، فإن مكونات القنبلة يتم غسيلها في كأس وكمية حامض H_2SO_4 ، HNO_3 في هذا المحلول يتم تعيينها.



شكل (١) مقطع للقنبلة

(١) قنبلة اسطوانية قوية (٢) قطعتين الصلب المقاوم (٣) قطب من انبوب (٤) محبس تحرر (٥) ترمومتر
(٦) خلاط كهربي (٧) اطراف الأشعال (٨) مقياس السعر الحراري (٩) سلك انصهار
(١٠) بوتقة (١١) غطاء مقلوظ (١٢) حبيبات الوقود (١٣) غلاف هوائي (١٤) مـاء

الحسابات:

وزن عينة الوقود = m جرامات

أعلى أو القيمة الحرارية الكلية للوقود = Θ سعر حراري/ الجرام.

وزن الماء الذي أخذ في مقياس السعر الحراري = ٧٧ جرام

مكافئ الماء لمقياس السعر الحراري، القنبلة، الترمومتر، الخلاط....الخ = ω جرام

درجة الحرارة الأولية = t_1°م

درجة الحرارة النهائية = t_2 °م

الحرارة المنطلقة بحرق الوقود = $m\,\theta$

الحرارة الممتصة بالماء، مقياس السعر الحراري.....الخ =$(w + \omega)\,(t_1 - t_2)$

الحرارة المنطلقة = الحرارة الممتصة

$$m\,\theta = (w + \omega)\,(t_2 - t_1)$$

القيمة الحرارية الكلية $\theta = \dfrac{(w+\varpi)(t_2 - t_1)}{m}$

ولكن لزيادة دقة النتائج، فإنه يلزم عمل التصحيحات الآتية في المعادلة السابقة:

(١) تصحيح الحامض t_A، تصحيح سلك الانصهار t_F، تصحيح خيط القطن t_T، تصحيح التبريد t_C. ولذلك فإن المعادلة السابقة يتم تعديلها كالآتي:

القيمة الحرارية الكلية $\theta = \theta = \dfrac{(w+\varpi)(t_2 - t_1 + t_C) - (t_A + t_F + t_T)}{m}$

حساب القيمة الحرارية الصافية: (Calculation of the Net Calorific Value)

القيمة الحرارية الصافية (Net.c.v.) = القيمة الحرارية الكلية (Gross.c.v.) – الحرارة المختزنة في بخار الماء المتكون أثناء حرق (m) جرامات من الوقود =

= القيمة الحرارية الكلية – ٠,٠٩ X H X ٥٨٧

حيث (H) هي نسبة الهيدروجين الموجود في الوقود والحرارة الكامنة للبخار هي ٥٨٧ سعر حراري/ الجرام.

التصحيحات: (Corrections)

(١) تصحيح الحامض (t_A):

الكبريت الموجود في الفحم يتحول إلى H_2SO_4 في القنبلة طبقا للمعادلات التالية:

$S + O_2 \rightarrow SO_2$

$2SO_2 + O_2 + 2\ H_2O \rightarrow 2H_2SO_4;\ \Delta H = 144.000$ Calories

(49 X 4)

(الوزن المكافئ (H_2SO_4) = ٤٩)

بالمـــثل النيتروجين الموجود في الفحم وجزء من ذلك في الهواء في القنبلة يتحول إلى (HNO_3).

$2N_2 + 5O_2 + 2H_2O \rightarrow 4HNO_3;\ \Delta H = -57.160$ Calories

63 X 4 (الوزن المكافئ لـــ HNO_3 = ٦٣)

حـــيث أن كـــلا التفاعلين السابقين هما من التفاعلات المنتجة للحرارة (Exothermic)، وحيث أن الحرارة المتولدة لا يتم الحصول عليها في الاستخدام العادي للفحم (لأن SO_2 و NO_2 يمر كلاهما إلى الجو) فإن التصحيح يجب عمله للحرارة المتولدة في القنبلة بتكوين H_2SO_4 ، HNO_3 كالآتي:

(أ) ٣,٦ سـعر حـراري يـتم طرحها لكل سم³ من ٠,١ عياري حامض الكبريتيك المتكون ($N/10, H_2SO_4$).

(ب) ١,٤٣ سـعر حراري يتم استقطاعها لكل سم ³ من ٠,١ عيراي حام النيتريك المتكون ($N/10\ HNO_3$) المتكون

"طبقا للمعادلات المعطاة سابقا"

(٢) تصحيح سلك الصهر (t_f) (Fuse wire correction)

يتم عمل التصحيح لكمية الحرارة بالسعر الحراري المكافئة الناتجة عن صهر وحرق السلك طبقا لبيانات المنتج.

(٣) تصحيح خيط القطن: (cotton thread correction)

التـصحيح لخـيط القطن المستخدم في إشعال الشحنة يتم حسابه من وزن خيط القطن الجـاف المستخدم على أساس أن القيمة الحرارية للسيليلوز هي ٤١٤٠ سعر حراري للجرام.

(٤) تصحيح التبريد: (cooling correction)

إذا كان الوزن اللازم لتبريد الماء في مقياس السعر الحراري من أقصى درجة حــرارة تم الوصول إليها إلى درجة حرارة الغرفة هو (x دقيقة) وأن معدل التبريــد هو(dt^0 / الدقيقة)، عندئذ يكون تصحيح التبريد = dtxx .
وهذا يتم إضافته إلى الزيادة الملاحظة في درجة الحرارة.

تعيين مكافئ الماء للجهاز: (Determination of the water equivalent)

أفــضل تعيين لمكافئ الماء للجهاز يتم بحرق وزن معين (يفضل حوالي ١,٢ جرام) من حامض البنزويك. (benzoic acid) (في شكل أقراص) في القنبلة في ظروف مــشابهة كمــا تم توضحيه. يتم ملاحظة الارتفاع في درجة الحرارة. يتم أخذ القيمة الحرارية القياسية لحامض البنزويك على أساس ٦٣٢٤ سعر حراري للجرام. حيث أن كل القيم الأخرى في المعادلة تكون معلومة، فإن مكافئ الماء للجهاز يمكن حسابه.
المواد الأخرى المناسبة كمعيار قياسي هي:

المادة	السعر الحراري
نفثالين	٩٦٢٢ سعر حراري/ الجرام
حامض الساليسيك	٥٢٦٩ سعر حراري/ الجرام
الكافور (Camphor)	٩٢٩٢ سعر حراري/ الجرام

مثال (١)

عين مكافئ الماء لجهاز قنبلة مقياس السعر الحراري والذي أعطى البيانات الآتية في التجربة:

وزن حامض البنزويك الذي أخذ = ١,٣٤٦ جرام

وزن عليه مقياس السعر الحراري = ١٠٢٥ جرام

وزن عليه مقياس السعر الحراري + الماء = ٣٠٢٥ جرام

درجة الحرارة الأولية = ١١,٨٧٢ °م

درجة الحرارة النهائية = ١٤,٦٢٥ °م

تصحيح التبريد = ٠,٠١٥ °م

-الحرارة من المصهرات (Fuses) = ٢٢ سعر حراري

غسيل القنبلة عند التحليل أظهر وجود ٣,٥ سم³ من (N/10 HNO_3) ولم يكن هناك H_2SO_4 متكون.

الحل:

وزن حامض البنزويك المأخوذ = ١,٣٤٦ جرام

وزن الماء المأخوذ في علبة مقياس السعر الحراري = (٣٠٢٥ جرام – ١٠٢٥ جرام)

= ٢٠٠٠ جرام.

تصحيح الارتفاع في درجة الحرارة = (١٤,٦٢٥ – ١١,٨٢٢) + ٠,٠١٥ =

٢,٧٥٣ + ٠,٠١٥ = ٢,٧٦٨ °م

الحرارة الناتجة بسبب حامض البنزويك =

(وزن حامض البنزويك X القيمة الحرارية) = ١,٣٦٤ X ٦٣٢٤

= ٨٦٢٦ سعر حراري

الحرارة من المصهرات (Fuses) = ٢٢ سعر حراري

الحرارة من HNO_3 = ٣,٥ X ١,٤٣ = ٥ سعر حراري

إجمالي الحرارة التي أعطيت لمقياس السعر الحراري =

(١) + (٢) + (٣) = ٨٦٢٦ + ٢٢ + ٥ سعر حراري

= ٨٦٥٣ سعر حراري.

إجمالي مكافئ الماء = $\frac{\text{الحرارة المعطاة لمقياس قياس السعر الحراري}}{\text{تصحيح الارتفاع في درجة الحرارة}}$

$$= \frac{٨٦٥٣}{٢,٧٦٨} = ٣١٢٦ \text{ جرام}$$

الماء الذي أخذ في مقياس السعر الحراري = ٢٠٠٠ جرام

مكافئ الماء لمقياس السعر الحراري والإضافات.

= (٣١٢٦ – ٢٠٠٠) جرام = ١١٢٦ جرام

مثال (٢):

يتم الحصول على البيانات التالية من تجربة قنبلة مقياس السعر الحراري:

وزن البوتقة = ٣,٦٤٩ جرام

وزن البوتقة + الوقود = ٤,٦٧٨ جرام

مكافئ الماء لمقياس السعر الحراري = ٥٧٠ جرام

الماء المأخوذ في مقياس السعر الحراري = ٢٢٠٠ جرام

الارتفاع الملاحظ في درجة الحرارة = ٢,٣ °م

تصحيح التبريد = ٠,٠٤٧ °م

تصحيح الأحماض = ٦٢,٦ سعرات حرارية

تصحيح سلك الصهر = ٣,٨ سعرات حرارية

تصحيح خيط القطن = ١,٦ سعرات حرارية

احسب القيمة الحرارية الكلية لعينة الوقود. إذا كان الوقود يحتوي على ٦,٥% هيدروجين، عين القيمة الحرارية الصافية.

الحل:

القيمة الحرارية العالية =

$$\text{High.c.v.} = \frac{(w + \omega)(t2 - t1 + tC) - (tA + tF + tT)}{M}$$

$$= \frac{(2200 + 570)(2.3 + 0.047) - (62.6 + 3.8 + 1.6)}{(4.678) - (3.649)}$$

$$= \frac{68 - (2770 \times 2.347)}{1.029}$$

$$= \frac{68 - 6510}{1.029}$$

= ٦٢٦١ سعرات حرارية

القيمة الحرارية المنخفضة سعر/ الجرام = (Low.C.V = (H.C.V - 0.09 X H X 587

= ٦٢٢٦ – ٠,٠٩ X ٦,٥ X ٥٨٧

= ٦٢٦١ – ٣٤٣,٤ = ٥٩١٧,٦ سعر حراري/ الجرام

٥- تعيين القيمة الحرارية لوقود السوائل المتطايرة والغازات: شكل (١/٢)

Determination of Calorific Value of Gases and Volatile Liquid Fuels:

القيمة الحرارة للوقود الغازي والسائل المتطاير يتم تعيينها باستخدام جهاز قياس السعر الحراري للغاز لبويز (Boy's Gas Calorimeter)

مخطط لشكل الجهاز المستخدم موضح في الشكل (٢/). وهذا الجهاز يتكون من الأجزاء الآتية:

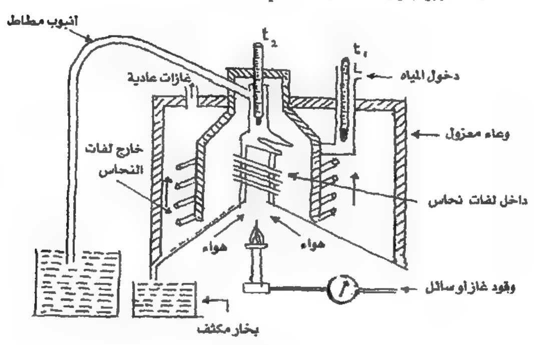
١. موقد الغاز (Gas Burner) حيث يحرق فيه حجم معين من الغاز عند ضغط معين بمعدل منتظم. يتم قياس حجم الغاز بواسطة مقياس مثبت قرب مدخل الغاز.

٢. يحاط الموقد بمدخنة أو غرفة حرق التي لها مواسير نحاس في كل من الداخل والخارج. خلال لفه مواسير النحاس، يسيل الماء بمعدل ثابت. يدخل الماء من أعلى اللفة الخارجية لمواسير النحاس ثم يمر خلال اللفة الخارجية ويتحرك إلى قاع المدخنة ثم عندئذ يتحرك إلى أعلى خلال داخل لفة مواسير النحاس ويخرج من أعلى.

٣. الترمومتر (t_1) و (t_2) مثبتين لملاحظة درجة حرارة دخول وخروج الماء على التوالي.

٤. يــتم توفيــر وعاء لجمع الماء الذي يتكون بسبب التكثف للبخار الناتج أثناء الحرق.

٥. كل التجهيز يكون مغلقا ومحاطا في غرفة عازلة.



شكل (٢) مقياس الطاقة الحرارية بطريقة (Boy)

العمل: (Working)

يــستمر حرق الوقود وتدوير المياه لمدة حوالي ١٥ دقيقة لفترة التدفئة الأولية. عندما تحدث سخونة لمقياس السعر الحراري يتم ضبط معدل اللهب بحيث يترك الماء الجهاز قريبا من الضغط الجوي. الحرارة الناتجة عن حرق الوقود الغازي تنقل إلى الماء في لفــة المواســير النحاسية وبخار الماء المتكون داخل المدخنة أثناء الحرق بتكثف إلى الماء الذي يتجمع. تلاحظ القراءات التالية، وذلك عند ثبات الظروف:

١. حجم الغاز المحترق عند درجة حرارة وضغط معين في زمن (t)، هذا الحجم عندئذ يتم تحويله إلى درجة الحرارة والضغط القياسي (STP).
٢. وزن الماء المار خلال الملف في الزمن (t).
٣. درجة حرارة الماء الداخل والماء الخارج.
٤. وزن الماء المكثف أثناء هذا الوقت.

الحسابات: لنفرض أن

Vm^3 = حجم الغاز المحروق عند درجة الحرارة والضغط القياسي في زمن معين (t)

WKg = وزن الماء المار خلال الملف النحاسي في زمن (t)

m = وزن الماء المكثف خلال هذا الوقت.

T_1 = درجة حرارة الماء الداخل.

T_2 = درجة حرارة الماء الخارج.

$T_1 - T_2$ = الارتفاع في درجة الحرارة.

C = القيمة الحرارية الكلية.

$W(T_2 - T_1)$ = الحرارة الممتصة بواسطة دوران الماء.

VC = الحرارة الناتجة عن حرق الوقود.

القيمة الحرارية الكلية (G.C.V) = $\frac{W(T_2 - T_1)}{V}$

القيمة الحرارية الصافية: (Net Calorific Value)

وزن الماء المكثف لكل متر مكعب من الغاز = v/m كجرام

الحرارة الكامنة للبخار لكل متر مكعب من الغاز = $\frac{587 \times m}{}$ كيلو سعر حراري

إذن القيمة الحرارية الصافية = $\left(\frac{\text{القيمة الحرارية الكلية} - ٥٨٧ \times m}{V}\right)$ كيلو سعر حراري/ م٣.

الحساب النظري للقيمة الحرارية للوقود:

نظريا يمكن حساب القيمة الحرارية للوقود في حالة معرفة النسبة المئوية للعناصر المكونة للوقود. طبقا لديلونج (Dulong)، فإن القيمة الحرارية للوقود هي مجموع القيم الحرارية لمكوناته.

القيمة الحرارية للكربون والهيدروجين والكبريت وجد أنها

(H = ٨٠٨) ، (C = ٣٤٥٠٠) ، (S = ٢٢٤٠) كيلو جرام/ السعر الحراري.

في حالة وجود الأكسجين كذلك، فإنه يتحد مع الهيدروجين ليكون الماء. لذلك فإن الهيدروجين في الشكل المتحد لا يكون متاحا للحرق ويسمى الهيدروجين المثبت. كمية الهيدروجين المتحة للحرق =

= الكتلة الكلية للهيدروجين – الهيدروجين المتحد مع الأكسجين

ولذلك نرى أن ، ٨ أجزاء بالوزن من الأكسجين تتحد مع جزء واحد بالوزن من الهيدروجين لتكوين الماء أي أنه لكل ٨ أجزاء من الأكسجين يحدث تثبيت لجزء واحد من الهيدروجين.

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$$

الوزن الجزيئي 2 16 18

يعادل ١جرام ٨جرام ٩جرام

إذن كمية الأكسجين المتاحة للحرق =

= إجمالي كتلة الهيدروجين – ١/٨ كتلة الأكسجين في الوقود

$$= H - \frac{O}{8}$$

معادلة ديولونج (Dulong) لحساب القيمة الحرارية كالآتي:

القيمة الحرارية الكلية (Gross.C.V)

= ١٠٠/١ [C ٨٠٨٠ + $(H - \frac{O}{8})$ ٣٤٥٠٠ + S ٢٢٤٠]كـــيلو سعر حراري/الكيلو جرام

حـــيث C ، H ، O ، S هي النسب المئوية للكربون، الهيدروجين، الأكسجين والكبريت على التوالي.

القيمة الحرارية الصافية: (Net Calorific Value) (NC.V):

= القيمة الحرارية الكلية G.C.V – ٩/١٠٠ H X ٥٨٧] كيلو سعر حراري/ الكيلو جرام

= القيمة الحرارية الكلية – H X ٠,٠٩ X ٥٨٧] كيلو سعر حراري/ الكيلو جرام

مثال:

أثناء تعيين القيمة الحرارية للوقود الغازي باستخدام مقياس السعر الحراري لبويل. تم تسجيل النتائج التالية:

حجم الوقود الغازي المحترق عند درجة الحرارة والضغط العادي = ٠,٠٩٨ م^{٣}

وزن الماء المستخدم كالآتي:

تبريد نواتج الحريق = ٥٠ كيلوجرام.

وزن البخار المكثف = ٠,٠٥١ كيلوجرام

درجة حرارة الماء الداخل = ٢٦,١ °م

درجة حرارة الماء الخارج = ٤٦,٥ °م

عين القيمة الحرارية الكلية والقيمة الحرارية الصافية للوقود.

القيمة الحرارية الكلية (G.C.V) = $\frac{W(T_2 - T_1)}{V}$

$$= \frac{٥٠ \quad X(٢٦,١ - ٤٦,٥)}{٠,٠٩٨} = ١٠٤٠٨,٢ \text{ كيلو سعر حراري/ م}^٣$$

القيمة الحرارية الصافية (M.C.V) = القيمة الحرارية الكلية − $\frac{m}{v}$ X الحرارة الكامنة لتكثيف البخار

$$= ١٠٤٠٨,٢ - \frac{0.051}{0.098} X ٥٨٧ = ١٠١٠٢,٧ \text{ كيلو سعر حراري/ م}^٣$$

٦- خواص الوقود الجيد:

عند اختيار الوقود لغرض معين، فإنه يجب مراعاة العوامل الآتية:

١. مناسبة الاستخدام: الوقود الذي يتم اختياره يجب أن يناسب الغرض المستخدم، فمثلا الكوك المنتج من الفحم البيتوميني هو المناسب للفرن العالي.
٢. القدرة الحرارية العالية: يجب أن يكون الوقود له قدرة حرارية عالية لأن القدرة الحرارية هي التي تحدد كفاءة الوقود. كلما زادت كمية الحرارة لوحدة الكتلة أو الحجم، كلما كان الوقود أفضل.
٣. درجة حرارة الاشتعال: (Ignition Temp) درجة حرارة الاشتعال هي أقل درجة حرارة يجب أن يتم تسخين الوقود إليها بما يمكن من الحرق الهادئ. الوقود الجيد يجب أن تكون له درجة حرارة اشتعال متوسطة. إذا كان الوقود له درجة حرارة اشتعال منخفضة فإن عملية التخزين والنقل تصبح خطيرة، حيث يمكن أن تحدث مخاطر الحريق. وإذا كانت درجة حرارة الاشتعال مرتفعة يصبح التخزين والنقل أسهل ولكنه يسبب صعوبة في الاشتعال.
٤. المحتوى من الرطوبة: المحتوى من الرطوبة يجب أن يكون منخفضا لأن وجود رطوبة عالية يقلل القيمة الحرارية للوقود.
٥. المحتوى من المواد الغير قابلة للاشتعال: المواد الغير قابلة للاشتعال تكون خبث (Clinker) بعد الحرق، ووجودها يقلل القيمة الحرارية وكذلك يضيف

تكاليف التخلص بعد الحرق.

٦. سرعة الاحتراق: سرعة الاحتراق يجب أن تكون معتدلة. السرعة العالية جدا للاحتراق غير مطلوبة، بينما السرعة المنخفضة جدا تسبب فقد في الحرارة بسبب الإشعاع.

٧. طبيعة المنتجات: المنتجات المتكونة يجب ألا تكون ضارة. المنتجات الغازية المنبعثة أثناء الحرق يجب أن تكون غير مسببة للروائح الكريهة أو أي تأثيرات ضارة أخرى.

٨. سعر الوقود: يجب أن يكون الوقود له سعر منخفض ومناسب وأن يكون متاحا بكميات كبيرة.

٩. الدخان: الدخان المنبعث يجب أن يكون أقل ما يمكن.

١٠. التحكم في العملية: يجب أن يكون الوقود بحيث أنه يمكن التحكم في حرقه أي أنه يمكن بسهولة بدايته أو إيقافه.

مقارنة بين الوقود الصلب، السائل، الغاز بالنسبة للخواص السابقة موضح في الجدول التالي.

جدول : المميزات النسبية للأشكال الطبيعية الثلاث للوقود

الوقود الصلب	الوقود السائل	الوقود الغازي
رخيص نسبيا ومتاح بسهولة	أعلى سعرا عن الوقود الصلب ولكنه رخيص في دول المصدر	باستثناء الغاز الطبيعي الوقود الغازي ينتج من الوقود الصلب أو السائل وبذلك يكون مكلف
التخزين، النقل، التداول يشكل صعوبة إلى حد ما	يسهل نقله. يجب الحرص عند التخزين في وعاء مغلق	يجب تخزينه في أوعية مانعة للتسرب ويحتاج إلى مساحة كبيرة للتخزين يمكن توزيعه خلال خطوط مواسير
يصنع قريبا من موقع الفحم	الأوعية، مساحات التخزين أقل	الإعداد يتم إما خلال مواسير

الوقود الصلب	الوقود السائل	الوقود الغازي
	مقارنة بالوقود الصلب والغازي	أو بالتسييل والحفظ تحت ضغط في اسطوانات حديدية اسطوانات (LPG)
الحرق عملية بطيئة وبمجرد بدايته يجب استمراره بالهواء. التحكم وتوقف الحرق ليس سهلا	الحرق يحدث سريعا، عملية الحرق يمكن التحكم فيها أو إيقافها عند الحاجة إلى ذلك.	أكثر سرعة في الإذابة مع الهواء مقارنة بالسوائل ويحدث الحرق سريعا وبكفاءة أعلى. الهواء المطلوب قليلا مقارنة بالوقود السائل أو الوقود الصلب. يمكن استمرار الجو المؤكسد أو المختزل المتعادل بالتحكم في الامداد بالهواء ولذلك فإنه تتاح مرونة أكبر في الاستخدام
بشكل ثابت ينتج بعض من الرماد حيث يشكل التخلص منه بعض المشاكل	الحرق نظيف وغير منتج للرماد ولكن الوقود حيث المحتوى العالي من الكربون والمواد الأرماتيكية يمكن أن تنتج دخان	لا إنتاج للرماد أو للدخان
يلزم عمالة لتشوين الفحم. لا يستخدم في محركات الاحتراق الداخلي. له كفاءة حرارية منخفضة	الحاجة إلى العمالة أقل. يستخدم في محركات الاحتراق الداخلي. كفاءته الحرارية أعلى من الوقود الصلب	يستخدم في محركات الاحتراق الداخلي. كفاءته الحرارية هي الأعلى.

الفصل الثانى



الوقود الصلب

الوقــود الــصلب الموجــود طبيعيا (الوقود الأولي) وكذلك الذي يتم تصنيعه وتجهيزه (الثانئي) يستخدم كثيرا في الأغراض المنزلية والصناعية. الخشب والأنواع المخــتلفة مــن الفحــم يــشكل الوقود الصلب الأولي الهام. الفحم النباتي أو الحيواني (Charcoal) أو الكوك...الخ يمثلوا الوقود الثانئي المنتج من الأنواع الطبيعية.

الخشب :

اســتخدم الخشب كوقود منذ زمن بعيد. ولكن، بسبب الإزالة الكبيرة التي حدثت في الغابــات فــإن الخــشب لــم يعد يستخدم عدا في مناطق الغابات حيث تكون أسعاره منخفضة جدا.

الخــشب الــذي تم قطعه حديثا يحتوي على ٢٥ – ٥٠% رطوبة. طبيعي أن اســتخدامه يتم في الحالة الجافة حيث يكون محتواه من الرطوبة من ١٠ إلى ١٥%. القــيمة الحــرارية للخــشب تتناسب مع محتواه من الماء. الجزء القابل للاحتراق من الخــشب غالــبا يكــون من السيليولوز واللجنتين المحتوى على آثار قليلة من الرماد المعدني. كذلك توجد الراتنجات والمواد الشمعية.

القــيمة الحــرارية للخشب الذي تم تجفيفه في الهواء هي حوالي ٣٥٠٠ إلى ٤٥٠٠ كــيلو ســعر حــراري لكل كيلو جرام. وهو يحترق بلهب طويل وغير منتج

للدخان، تاركا كمية قليلة من الرماد. رغم أن المحتوى من المواد قليلا إلا أن المحتوى من الأكسجين مرتفعا جدا. وهذا يجعل حتى الخشب الجاف له قيمة حرارية منخفضة. ولكن ما تزال خاصية انخفاض درجة حرارة اشتعال، اللهب الغير منتج للدخان وعدم وجود مشاكل مصاحبة للتخلص من الرماد هي النقط البارزة لمميزات الخشب. الخشب يستخدم كثيرا كوقود منزلي.

الفحـــم النباتي يتم إنتاجه بالتقطير الإتلافي للخشب. الاستخدام الرئيسي للفحم النباتـــي (Charcoal) هو في إنتاج الفحم المنشط الذي يستخدم على نطاق واسع لإزالة اللون في صناعة السكر وتبييضه.

الفحم: (Coal):

الفحـــم يعتبـــر وجـــود حفر (Fossil) الناتج عن أنقاض في النبات التي تعرضت لظـــروف مـــن درجات الحرارة المرتفعة والضغط المرتفع خلال ملايين السنين. من الناحية الكيميائية فإن الفحم مادة عضوية معقدة بها كميات مختلفة من المياه مع كميات من النيتروجين والكبريت. تحول أنقاض النبات إلى الفحم يحدث على مرحلتين:

١. **المرحلة البيوكيميائية أو مرحلة فحم المستنقعات (Peat):**

أثـــناء هذه المرحلة تم مهاجمة المادة النباتية بالعديد من الكائنات الحية الدقيقة. المنتج النهائي لهذه المرحلة هو فحم المستنقعات ويرمز له بالآتي:

$$2(C_6H_{10}O_5)_n$$

٢. **التحول الكيميائي أو التحويلي:**

فـــي هذه المرحلة فإن رواسب فحم المستنقعات المدفونة تحت الصخور الرسوبية تفقد الـــرطوبة والمكـــونات المتطايرة نتيجة تأثير درجة الحرارة العالية والضغط المرتفع. يـــصبح فحـــم المـــستنقعات غني بالكربون عند انخفاض محتواه من الأكسجين. فحم المـــستنقعات الإســـفنجي يتحول إلى فحم صلب ذو قصافة (Brittle) بالتدريج. الوقت اللازم لتكوين الفحم البني الحديث (Young Brown) هو حوالي $١٠^{٧}$ سنوات بينما ذلك لمعظم الفحم الطبيعي هو ٣×١٠^{٨} سنوات.

تقسيم الفحم:

ينقسم الفحم على أساس رتبته. والتي تعرف بأنها درجة التفحم من المادة الأصلية، الخشب. عند تحول الخشب إلى فحم تحدث زيادة تدريجية في تركيز الكربون وانخفاض في تركيز الأكسجين والنيتروجين. تعطي رتبة لأنواع الفحم طبقا للمحتوى من الكربون للفحم من الخشب إلى الفحم النباتي.

يمكن تقسيم الفحم إلى الرتب الآتية جدول (١)

نوع الفحم	نسبة (الجفاف على أساس الخلو من المواد المعدنية)					نسبة الرطوبة %	القيمة الحرارية
	C	H	O	N	مواد متطايرة		
خشب ↓	٥٠-٤٠	٦-٥	٤٠-٢٠	٠,٥	–	٩٠-٧٠	٤٥٠٠-٤٠٠٠
فحم المستنقعات ↓	٦٠-٤٥	٦,٥-٣,٥	٤٥-٢٠	٣-٠,٧٥	٦٠-٤٥	٩٠-٧٠	٥٢٨٠-٤١٢٥
الفحم البني ↓	٧٥-٦٠	٥,٥-٤,٥	٣٥-١٧	٢-٠,٧٥	٦٠-٤٥	٥٠-٣٠	٧٤٠٠-٦٦٠٠
الفحم البيتوميني ↓	٩٠-٧٠	٥,٥-٤	٣٠-٢٠	٢-٠,٧٥	٥٠-١١	٢٠-١٠	٨٨٠٠-٦٦٠٠
فحم الأنثراثيت (النباتي)	٩٥-٩٠	٤-٣	٣-٢	٢-٠,٥	١٠-٣,٨	٣,٥-١,٥	٨٨٠٠-٨٤٧٠

لهذا يتضح من الجدول أنه كلما زاد المحتوى من الكربون وزادت القيمة الحرارية للكربون مع زيادة درجة التفحيم، فإنه تقل نسبة الهيدروجين والأكسجين والنيتروجين والمواد المتطايرة والرطوبة مع زيادة درجة التفحيم.

١- فحم المستنقعات: (Peat)

فحم المستنقعات هي أول مراحل تكون الفحم من السيليلوز. وهو ليس فحم أو خشب ولكنه في مرحلة متوسطة بين الاثنين. وهو يتكون بالتحلل التدريجي للمادة

النباتــية في الأماكن الرطبة. فحم المستنقعات له لون ما بين البني والأسود وبه كمية كبيرة من الماء. مكونات فحم المستنقعات ٨٥% رطوبة، ١٠٤ مواد متطايرة، ٤,٦% كــربون مثــبت. مكونات المادة العضوية الموجودة في فحم المستنقعات تتوقف على درجة التحلل. كلما زادت درجة التحلل كلما زاد المحتوى من الكربون.

الفحــم الحجــر لــيس وقود اقتصادي بسبب نسبته المرتفعة من الرطوبة وقلة قيمته الحــرارية. فحــم المستنقعات الذي تم تجفيفه في الهواء له قيمة حرارية ٥٤٠٠ كيلو سعر حراري/ الكيلو جرام. يستخدم فحم المستنقعات كذلك كسماد وكمادة حشو بسبب قوامة اللين وطبيعته الإسفنجية.

يــتم تجفــيف الفحــم الصخري في الهواء إلى نسبة رطوبة ٥٠% ثم غربلته (Screened). المســحوق الذي يتم الحصول عليه يتم تجفيفه في الهواء ثانيا إلى نسبة رطــوبة حتى ١٠% ثم يتم تشكيل المادة في شكل قوالب في ماكينات الضغط. (عملية القولبة هي لتحويل الحبيبات إلى كتلة مدمجة بإضافة أو بدون إضافة مادة ربط. الكتلة المتكونة تسمى القالب)، وهذه القوالب تستخدم في بعض البلدان كوقود منزلي.

(٢) اللجنيت أو الفحم البني: (Lignite Or Brown Coal)

وهذا مرتبط بالمرحلة ما بين الفحم الصخري والفحم الأسود. وهو يعتبر فحم غيــر ناضج ويحتوي على نسبة عالية من الرطوبة في المجال من ٣٥ – ٦٠%. عند الجفاف في الهواء فإن الرطوبة تجف إلى حد ما. اللجنيت عند تعرضه للهواء يمتص الأكسجين بسرعة ويحترق في نفس الوقت. لذلك فإنه لا يتم تخزينه في مكان مفتوح. المحتوى من الكربون والأكسجين للجنيت الذي تم تجفيفه في الهواء هو حوالي ٧٠% و ٢٠% علــى التوالي. وهو يحترق مع ظهور لهب طويل ودخان وله قيمة حرارية حوالي ٥٨٠٠ – ٧٠٠ كيلو سعر حراري/ الكيلو جرام على أساس عدم الجفاف (Dry Free Basis).

اللجنيت لا يعتبر وقود جيد ولكنه أفضل من فحم المستنقعات. وهو عموما يتم تحــويله إلــى قوالب بعد إزالة الرطوبة ويستخدم كوقود منزلي. يستخدم اللجنيت في

إنـــتاج الغاز المنتج – غاز المولدات (Producer - Gas) . عند الكربنة (Carbonization) فإنه ينتج القار وكبريتات الأمونيا. كبريتات الأمونيا تستخدم كسماد.

(٣) الفحم البيتوميني (الفحم العادي):

هــذا الفحم هو الرتبة التجارية العادية للفحم. وهو له لون ما بين الرمادي الداكن إلـــى أسود القطران ويحترق بلهب أصفر به دخان. وله بريق ما بين اللامع والباهت. الفحـــم البيتوميني له بناء طبقي من طبقات متطابقة ومتتالية لامعة وعاتمة أو باهتة. القيمة الحرارية للفحم البيتوميني مرتفعة إلى حد ما، حوالي ٧٠٠٠ كيلو سعر حراري/ الكيلو جرام إلى ٨٠٠٠ كيلو سعر حراري/ الكيلو جرام. وبه تركيز جيد من الكربون المثـبت فـــي مكوناته. الفحم البيتوميني العادي ينقسم طبقا لمحتواه من الكربون إلى الآتي:

الشبيه بالفحم البيتوميني: (Sub-bituminous Coals)

وهـــو فحم أسود قاتم ويصعب تمييزه على الفحم البيتوميني العادي. الفحم الشبيه بالفحم البيتوميني هو برتبة أدنى من الفحم البيتوميني ويبدو أنه شريطي (Banded) مثل الفحم البيتوميني. هذه الشرائط أو الطبقات ذات التصاق ضعيف حيث يمكن أن تنفصل بسهولة إلى شرائح بدلا من أن تتكسر إلى كتل مستطيلة. مثل اللجنيت فإن الفحم الشبيه بالفحم البيتوميني يتفتت عند تعرضه للجو. لذلك فإنه من الصعوبة نقله.

الفحـــم الشبيه بالفحم البيتوميني به ٧٠ – ٨٠% كربون والمحتوى من الأكسجين يتـــراوح ما بين ١٠ – ٢٠%. القيمة الحرارية هي حوالي من ٦٨٠٠ – ٧٦٠٠ كيلو ســـعر حـــراري/ الكـــيلو جرام. وهو يحترق بسهولة ويمكن استخدامه لرفع البخار لأغراض مختلفة.

فحم البيتومين: (Bituminous Coal)

الفحـــم البيتومينـــي هـــو النوع الأكثر شيوعا والأكثر استخداما من أنواع الوقود الـصلب الحفري. الفحم البيتوميني الجيد يتكون من شرائح متتالية باهتة ولامعة.

لكـونه قـصف (Brittle)، فـإن هذا لفحم ينكسر بسهولة إلى كتل رقيقة في شكل منشوري أو شبه مكعب عند حفرة. المحتوى من الكربون مرتفع ويتراوح من بين ٧٨ – ٩٠%. القـيمة الحرارية بفحم البيتومين هي ما بين ٨٠٠٠ – ٨٥٠٠ كيلو سـعر حـراري/ الكـيلو جرام. الفحم البيتوميني سهل التداول وله نوعية تسخين ممـتازة. وهـو يستخدم غالبا في معظم دول العالم. الفحم من هذا النوع (الرتبة) يـستخدم بكمـيات كبيـرة في الصناعة في عمل الكوك الميتالبرجي، غاز الفحم والبخار للتسخين المنزلي.

١. **الفحم البيتوميني الفائق:** (Superbituminous Coal)

الفحم البيتوميني الفائق هو أعلى درجات الفحم وبه نسبة عالية من الكربون تتـراوح ما بين ٩٠ – ٩٥%. قيمته الحرارية تتراوح ما بين ٨٥٠٠ كيلو سعر حراري إلى ٨٦٠٠ كيلو سعر حراري/ الكيلو جرام. وهو غير منتج للـدخان (Smokeless) عند الحرق وله أفضل طاقة تسخين من بين أنواع الفحم. يستخدم الفحم البيتوميني الفائق في صناعة الكوك (Coke).

٢. **فحم الأنثراسيت:** (Anthracite)

الأنثراسيت هو المرحلة الأخيرة لتكون الفحم من المادة النباتية. وبه أكبر نـسبة مـن الكربون (٩٢ – ٩٨%) وبه أدنى نسبة من المواد المتطايرة والـرطوبة. وهو يحترق بلهب أزرق قصير غير مدخن. القيمة الحرارية للأنثراسـيت حوالي ٨٦٠٠ كيلو سعر حراري/ كيلو جرام. وهو يحترق بحـرارة محلـية شديدة جدا. الأنثراسيت هو الأكثر صلابة من بين أنواع الفحم الأخرى. وله مظهر براق، أحيانا يبدو في شكل الجرافيت. وليس له قـوة تكـتل أو قولـبة. الاستخدامات الصناعية الرئيسية للأنثراسيت هي الغلايات، المواقد المنزلية (الدفايات) والأفران الميتالبرجية.

تحليل الفحم: (Analysis of Coal)

مكونات الفحم تختلف طبقا لدرجة التفحيم. لمقارنة أنواع الفحم للاستخدام فإنه يتم

عمـــل التحاليل. الطرق التفصيلية للتحاليل والاختبارات وإن كانت تختلف من بلد إلى آخر إلا أنها تنقسم إلى قسمين:

١. تحاليل تقريبية.
٢. تحاليل كلية.

ويتم تسجيل نتائج التحاليل بالطرق الآتية:

- على أساس حالة الاستلام.
- على أسا الجفاف الهوائي.
- علـــى أساس الخلو من الرطوبة (التجفيف في فرن التجفيف)
- على أساس الخلو من الرطوبة والرماد.

١- التحليل التقريبي: (Proximate Analysis)

التحلـــيل التقريبـــي يعتبـــر تحليل اختباري هام. البيان يختلف طبقا للطريقة المستخدمة ولذلك يسمى التحليل التقريبي. وهو يعطي معلومات عن الاستخدام العملي للفحم. التحليل الأولي للفحم يعين الرطوبة، الرماد، والمواد المتطايرة والكربون المثبت للفحم.

أ- المحتوى من الرطوبة:

طـــبقا لطبـــيعة وأصـــل الفحم فإنه دائما مرتبط بالرطوبة.عند تعرض الفحم الـــرطب إلـــى الجـــو، فإن الرطوبة الخارجية تتبخر ولكن الفحم الجاف ظاهريا يظل محتويا على بعض الرطوبة. هذه الرطوبة تعرف بأنها رطوبة تجفيف الهواء.
رطوبة تجفيف الهواء يتم تعيينها بتسخين كمية معلومة من الفحم (بالجفاف الهوائي إلى ١٠٥ – ١١٠ °م فـــي فـــرن كهربي هوائي ساخن لمدة حوالي ساعة. بعد الساعة يتم سحبه من الفرن وتبريده في مجفف ووزنه. الفقد في الوزن للفحم يتم تسجيله كمحتوى من الرطوبة على أساس نسبة مئوية.

$$\text{النسبة المئوية للرطوبة} = \frac{\text{الفقد في الوزن}}{\text{وزن عينة الفحم}} \times ١٠٠$$

ملاحظة:

- زيادة الرطوبة في الفحم غير مرغوبة.
- الرطوبة تقلل القيمة الحرارية للفحم وتأخذ كمية كبيرة من الحرارة المنتجة في شكل حرارة كامنة للبخر. لكل نسبة مئوية من الرطوبة الموجودة. يفقد ١% من الحرارة. الرطوبة كذلك تزيد تكاليف النقل.
- زيادة الرطوبة السطحية قد تسبب صعوبة في تداول الفحم.
- زيادة وجود الرطوبة تعمل على تبريد اللهب في الفرن.

لذلك فإن قلة المحتوى من الرطوبة، تعني نوعية فحم أفضل كوقود. ولكن وجود حوالي ٥ – ١٠% رطوبة يكون مرغوبا فيه لأنه ينتج طبقة وقود متجانسة والقليل من الرمادي المتطاير.

ب- المادة المتطايرة:

المادة المتطايرة في الفحم تتكون من خليط معقد من المنتجات الغازية والسائلة نتيجة التحلل الحراري للفحم. المادة المتطايرة لا تشمل الرطوبة في الفحم. وهي تتكون أساسا من غازات قابلة للاحتراق مثل H_2، CO ، CH_4 و مواد كربوهيدراتية أخرى (Carbohydrates).

يتم تعيينها بتسخين وزن معين من عينة الفحم الخالية من الرطوبة في بوتقة غير مغطاة من البلاتين عند درجة حرارة ٩٥٠ ± ٢٠ °م لمدة سبع دقائق. عند درجة الحرارة هذه، يتم طرد الهيدروكربونات والهيدروجين.

يتم تبريد البوتقة، أولا في الهواء، ثم داخل مجفف (Dessicator) ووزنها. الفقد في الوزن يتم تسجيله كمادة متطايرة على أساس نسبة مئوية.

$$\text{النسبة المئوية للمادة المتطايرة} = \frac{\text{الفقد في الوزن بسبب إزالة المادة المتطايرة}}{\text{وزن عينة الفحم}} \times ١٠٠$$

ملاحظات:

- النسبة العالية من المادة المتطايرة تبين أن نسبة كبيرة من الوقود حرقت كغاز أو بخار وقد تنطلق بدون حرق.
- المحتوى العالي من المادة المتطايرة يعطي لهب طويل، دخان كثيف وقيمة حرارية منخفضة نسبيا.
- للاستخدام الكفء للفحم، فإن الغازات الخارجة القابلة للاحتراق (المادة المتطايرة) يجب حرقها بتوفير هواء ثانوي. وهذا يتطلب مساحة ضخمة للحرق. الفرن بحجم الحرق الصغير أو اللهب القصير يكون غير مناسب لحرق الفحم ذو المواد المتطايرة العالية، ذلك لأن كمية كبيرة من المواد المتطايرة سوف يهرب بدون حرق.
- الفحم ذو المواد المتطايرة العالية لا يشكل جيدا في شكل قالب (cake) بينما الفحم ذو المستوى المتوسط من المواد المتطايرة المحتوي على ٢٠ – ٣٠% مواد متطايرة يمكنه تكوين قالب قوي وصلب عند الكربنة.
- الفحم المحتوي على أقل من ١٤% من المواد المتطايرة لا يمكن تشكيله في قالب مطلقا ولذلك لا يكون مناسبا في تصنيع الكوك.

ولكن المحتوى العالي من المواد المتطايرة يكون مطلوبا في صناعة غاز الفحم (Coal Gas) حيث أن المواد المتطايرة في الفحم تدل على نسبة الفحم الذي سوف يتحول إلى منتجات من الغاز والقار بالحرارة.

جـ الرماد: (Ash)

الفحم يحتوي على مواد غير عضوية معدنية التي تتحول إلى رماد بالتفاعلات

الكيميائــية أثناء حرق الفحم. الرماد عادة يتكون من السيليكا، الألومينا، أكسيد الحديد وكميات صغيرة من الجير الحي (CaO) ، الماجنيزيا (MgO). الخ.

المحتوى من الرماد يتم تعيينه بتسخين المتبقي بعد إزالة المادة المتطايرة عند ٧٠٠ ± ٥٠ °م لمدة نصف ساعة بدون غطاء.

$$\text{نسبة الرماد} = \frac{\text{وزن المتبقي}}{\text{وزن عينة الفحم}} \times ١٠٠$$

يمكــن تقسيم الرماد كرماد أصيل وكرماد عارض. المادة المعدنية الموجودة أصــلا فــي المادة النباتية التي تكون منها الفحم تسمى الرماد الأصلي (Intrinsic Ash) ويتكون من Na ، K، Mg ، Ca، Si.

علــى الجانــب الآخر، المادة المعدنية مثل الطفل، الجبس، مواد أخرى التي تخــتلط أثــناء عملية استخراج الفحم من المنجم أو تداول الفحم تمثل الرماد العارض (Extrinsic Ash) والــذي يظــل كمتبقي بعد الحرق. هذا الرماد العارض قد يتكون من المركبات اللامائية الآتية:

Fe_2O_3, $CaCO_3$, $CaSO_4$ ..... الخ.

المــواد المعدنــية المسببة لوجود الرماد العارض لا يمكن إزالتها بأي وسيلة ميكانيكية. لحسن الحظ هذا المحتوى من المادة المعدنية يكون منخفضا (حوالي ٢ – ٣ %) بينما المحتوى من الرمادي الأصلي يكون مرتفعا.

ملاحظات:

- النــسبة العالــية مــن الرماد غير مرغوب فيها. الرماد لا يساهم في الطاقة الحــرارية للفحــم. علــى العكس فإنه يقلل القيمة الحرارية ويسبب كثيرا من الصعوبات لاستخدام الفحم بكفاءة.
- فــي فرن بالمصبعات (الشبكة) الحديدية، يمكن أن يعيق الرماد مرور الهواء ويقلل معدل الحرق.
- الرماد العالي يؤدي إلى فقد كبير في الحرارة ويسبب مشاكل لتكوين كتل من

الـــرماد (Clinkers). تم تقدير أن ارتفاع ١% في رماد الفحم يكافئ من ٠,٣ – ٤% خفض في كفاءة الغلاية.

- مكـــونات الرماد ومجال الانصهار يؤثر كذلك على كفاءة الفحم. مكوناته ذات أهمـــية كبيـــرة فـــي العملـــيات الميتاليرجية التي تؤثر على مكونات الخبث والمعدن.
- عـــند استخدام الفحم في الغلاية، فإن درجة حرارة انصهار الرماد تكون ذات أهمية كبيرة. عموما درجة حرارة الانصهار تقع في المجال ما بين ١٠٠٠ – ١٧٠٠ °م. الـــرماد الـــذي درجة حرارة انصهاره أقل من ١٢٠٠ °م يسمى المنـــصهر (Fusible) و أكثـــر مـــن ١٤٣٠ °م يسمى الرماد المنيع. في حالة انصهار الرماد عند درجة حرارة التشغيل فإنه يؤدي إلى تكون كتل من الرماد (Clinker).
- بصرف النظر عن الفقد في كفاءة الفحم، فإنه تكون كتل أو كرات من المراد يـــؤدي إلى فقد في الوقود حيث أن بعض حبيبات الوقود تحتويها هذه الكتل. ولكن بعض من الرماد يكون مرغوبا فيه حيث أنه يحمي المصبعات الحديدية الشبكية من الالتصاق المباشر بالفحم المتوهج والذي يمكن أن يسبب الأكسدة لأسياخ المصبعات الحديدية (Grate).

د- الكربون المثبت: (Fixed Carbon)

المحـــتوى من الكربون المثبت يزداد من الفحم ذو الرتبة المنخفضة مثل اللجنيت إلى الفحم ذو الرتبة العالية مثل الأنثراسيت. زيادة نسبة الكربون المثبت تعني زيادة القيمة الحـــرارية وكـــذلك النوعية الأفضل للفحم. هذا يمثل كمية الكربون التي يمكن حرقها بالتيار الأولي للهواء. نسبة الكربون المثبت يتم تعيينها بالآتي:

نسبة الكربون المثبت = ١٠٠ – [نسبة الرطوبة % + المادة المتطايرة + الرماد]

مـــن المعادلـــة السابقة، يبدو أن ما يترك بعد طرح كمية الرطوبة والمواد المتطايرة

والـــرماد المتكون يساوي الكربون المثبت. ولكن، مصطلح الكربون المثبت غير دقيق حيث أنه يحتوي على عناصر أخرى غير متطايرة مع الكربون.

ملاحظات:

- زيادة نسبة الكربون المثبت يقابلها زيادة في القدرة الحرارية.
- نسبة الكربون المثبت تساعد في تصميم الفرن وشكل صندوق الحرق ذلك لأن الكربون المثبت يحترق وهو في الحالة الصلبة.

٢- **التحليل الكلي**: (Ultimate Analysis)

التحليل الكلي للفحم يتم لتأكيد مكونات الفحم. عند استخدام الفحم في الأغراض الصناعية يكون من الضروري تعيين نسبة المكونات وذلك لإمكان تصنيف نوعية الفحم، وتعيين سعره، هذا بالإضافة إلى وضع الفحم في الاستخدامات المختلفة طبقا لمكوناته.

التحليل الكلي يتضمن تقدير الكربون، الهيدروجين، الكبريت، النيتروجين والأكسجين.

أ- الكربون والهيدروجين: شكل (١/٣)

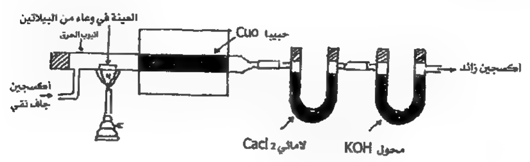
يتم وضع عينة معلومة من الفحم في أنبوب الحرق ويتم الحرق في كم زائد مـــن الأكسجين النقي (خالي من الرطوبة ومن CO_2). الكربون والهيدروجين الموجود في الوقود يتحول إلى CO_2 ، H_2O على التوالي.

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

$$H_2 + 1/2\ O_2 \rightarrow H_2O$$

المنتجات الغازية للحرق يتم تمريرها خلال بصيلتين (2 Blubls) أحدهما تحتوي على كمية موزونة من $CaCl_2$ الذي يمتص الماء، والأخرى تحتوي على كمية موزونة من KOH الذي يمتص ثاني أكسيد الكربون.

يتم حساب نسبة الكربون والهيدروجين من الزيادة في وزن كلا أنبوبي الامتصاص.



شكل (١/٣) تقدير الكربون والهيدروجين

$$2KOH + CO_2 \rightarrow K_2CO_3 + H_2O$$
$$CaCl_2 + 7\,H_2O \rightarrow CaCl_2.\,7H_2O$$

بفرض أن وزن عينة الفحم = X جرام

الزيادة في وزن أنبوب $CaCl_2$ = Z جرام

الزيادة في وزن أنبوب KOH = Y جرام

٤٤ جرام من CO_2 تحتوي = ١٢ جرام من الكربون.

Y جرامات من CO_2 يحتوي = $\frac{Y \times ١٢}{٤٤}$ من الكربون

١٨ جرام من الماء تحتوي = ٢ جرام من الهيدروجين

Z جرامات من الماء تحتوي = $\frac{Z \times ٢}{١٨}$ جرامات من الهيدروجين.

نسبة الهيدروجين = $\frac{٢}{١٨} \times \frac{Z \times ١٠٠}{\text{وزن عينة الفحم}}$

ملاحظات:

- القيمة الحرارية للوقود تتناسب مع محتواها من الكربون. لذلك فإن زيادة المحتوى من الكربون تمثل زيادة في القيمة الحرارية للوقود.
- زيادة نسبة الكربون كذلك تقلل حجم غرفة الحرق.

- زيـــادة نسبة الهيدروجين تزيد كذلك القيمة الحرارية للفحم. محتوى الفحم من الهيدروجـــين يتراوح ما بين ٤,٥ إلى ٦,٥% من فحم المستنقعات إلى مرحلة الفحـــم البيتوميـنـــي. الهيدروجين في الفحم مسئول عن إنتاج كثيرا من المواد المفـيدة/ مـــثل، الهيدروجين الغازي، الميثان وكيماويات الفحم في صناعات الكربنة (Carbonization) وصناعة الغازات.

ب- النيتروجين: شكل (١/٤)

النيتروجين الموجود في عينة الفحم يمكن تقديره بالطريقة الآتية:

- وزن عينة من الفحم مع K_2SO_4 + $HgSO_4$ الذي يعمل كعامل وسيط يتم تسخينه مع حامض كبريتيك مركز (H_2SO_4). النيتروجين الموجود في الفحم يتحول إلى [$(NH_4)_2SO_4$] كميا.

حرارة

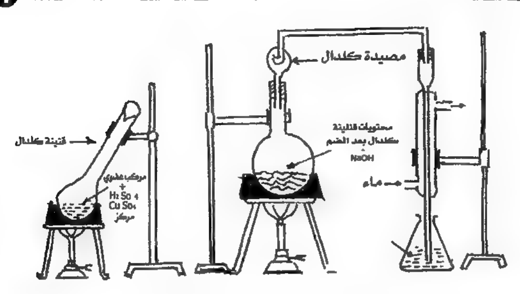
نيتروجين + H_2SO_4 ← $(NH_4)_2SO_4$

(من الفحم)

- يتم عندئذ نقل المحتويات إلى قنينة ذات قاع مستدير ويتم تسخين المحلول مع زائد من (NaOH).
- غـــاز NH_3 الـــذي يـــنطلق يتم امتصاصه في حجم معين من محلول حامض عياري.
- الحامض الغير مستخدم يتم عندئذ تعيينه بالمعايرة بـــ (NaOH).

من حجم الحامض المستخدم بواسطة NH_3 المنطلق، يمكن حساب نسبة النيتروجين.

$$(NH_4)_2SO_4 \xrightarrow{2NaOH} NO_2SO_4 + 2NH_3 + 2H_2O + 2H_2O$$
$$2NH_3 + H_2SO_4 \rightarrow (NH_4)_2SO_4$$



(ب) تقطير كلدال (أ) هضم (تسخين في قنينة كلدال)

شكل (١/٤) تقدير النيتروجين بطريقة كلدال

بفرض أن وزن عينة الفحم = W جرام

حجم الحامض المستخدم (المستهلك) = V_1 سم^٣

عيارية الحامض = N_1

V_1 سم^٣ من حامض عياري N_1 = ٧٢ سم^٣ لـ NH_3N_2

إذن V_2 سم^٣ لـ $INNH_3$ = $N_1 \times V_1$ سم^٣ من الحامض

ولكن ١٠٠٠ سم^٣ لواحد عياري.

محلول الأمونيا = ١٧ جرام من NH_3 = ١٤ جرام من النيتروجين

V_2 سم^٣ لمحلول أمونيا واحد عياري = $\frac{N_1 \times 14}{1000}$ V_1 جرام من النيتروجين.

(بما أن $V_2 = N_1V_1$ سم^٣)

إذن نسبة النيتروجين = $\frac{14}{1000} \times \frac{1000 \times V_1 \times N_1 \times}{W} = \frac{V_1 \times N_1 \times 1.4}{W}$

المحتوى من النيتروجين في معظم الفحم يكون ما بين ١ – ٢%. وهو ليس له قيمة حرارية وبالتالي فإن وجوده غير مرغوب فيه. ولكنه مفيد في صناعات الكربنة والتـي تستعيد جزء منه كمنتجات ثانوية ذات قيمة مثل NH_3 ، $(NH_4)_2SO_4$ وكذلك أساس بيريدين (وهو مذيب أروماتي).

جـ- الكبريت:

الكبـريت الموجـود فـي الفحم يتأكسد بواسطة حامض النيتريك المركز إلى حـامض الكبريتيك. يتم ترسيب حامض الكبريتيك ككبريتات باريوم ($BaSO_4$) بإضافة ($Bacl_2$) كمـيا. كذلك، يمكن كذلك تعيين الكبريت بالغسيل الناتج من كتلة معلومة من الفحـم المـستخدم فـي قنبلة مقياس المسعر الحراري لتعيين قيمتها الحرارية. الغسيل يحتوي على كبريت في شكل الكبريتات حيث يرسب بإضافة ($Bacl_2$) إلى ($BaSO_4$). راسـب $BaSO_4$ مـن أي من الطرق السابقة يتم ترشيحه وتسخينه إلى وزن ثابت. من وزن $BaSO_4$ يتم حساب الكبريت الموجود في الفحم.

إذا كان وزن عينة الفحم = W جرام.

وكتلة الراسب = W_1 جرام

بما أن ٢٣٣ جرام من $BaSO_4$ = ٣٢ جرام من الكبريت

W_1 جرام من $BaSO_4$ = $\frac{٣٢\ W_1}{٢٣٣}$ جرام

نسبة الكبريت = $\frac{٣٢}{٢٣٣} \times \frac{W_1}{W} \times ١٠٠$

ملاحظات:

رغم أن الكبريت يساهم في القيمة الحرارية للفحم، إلا أنه مكون غير مرغوب فـيه. فهـو ينـتج SO_4، SO_3 أثناء الحرق وكذلك المنفر H_2S أثناء كربنة الفحم. هذه الغـازات تسبب كذلك تلوث للبيئة الجوية. الفحم المحتوي على الكبريت غير مناسب

لتحضير الكوك الميتاليرجي لأن له تأثير سلبي على خواص المعدن.

فمـــثلا فـــإن وجود الكبريت في الكوك المستخدم في صناعة الحديد يؤثر على نوعية وخواص الصلب.

د- الرماد:

الرماد يتم تعيينه بنفس الطريقة كما في حالة التحليل التقريبي.

هـ- الأكسجين:

الأكـــسجين عادة يتم تعيينه بطريقة الفرق. يعبر عن الكربون، الهيدروجين، النيتروجين والكبريت على أساس نسبة مئوية ومجموعهم يتم طرحه من ١٠٠.

النسبة المئوية للأكسجين = ١٠٠ – (النسبة المئوية $C + H_2 + N_2$ + رماد)

ملاحظات:

كلمـــا قـــل المحتوى من الأكسجين في الفحم كلما كان الفحم أفضل. هذا لأن المحتوى من الأكسجين في الفحم عادة يصاحبه الرطوبة، قيمة حرارية منخفضة وقوة تكويك منخفضة. بالإضافة إلى أن الأكسجين يكون في شكل متحد مع الهيدروجين في الفحم وبذا يقل حجم الهيدروجين المتاح للاحتراق عن إجمالي الهيدروجين الموجود. القيمة الحرارية تقل بحوالي ١,٧% لكل ١% زيادة في الأكسجين.

٣- أمثلة على التحاليل الأولية والكلية:

مثال:

عينة من الفحم تم تحليلها كالآتي:

تم وزن ٢ جرام في بوتقة من السيليكا. بعد التسخين لمدة ساعة عند ١١٠ °م كـــان وزن الراسب المتبقي ١,٩٧٥ جرام. البوتقة التالية كانت مغطاة بغطاء للتنفيث والتـــسخين القوي لمدة سبعة دقائق تماما عند ٩٥٠ ± ٢٠ °م. وزن الراسب ١,٣٢٨ جرام. تم تسخين البوتقة عندئذ بدون غطاء، حتى الحصول على وزن ثابت. الراسب

الأخير وجد أنه يزن ٠,٢٠٥ جرام.

إحسب نسبة نتائج التحاليل السابقة.

الحل:

كتلة الرطوبة في عينة الفحم = ٢ – ١,٩٧٥ = ٠,٠٢٥ جرام

كتلة المواد المتطايرة = ١,٩٧٥ – ١,٣٢٨ = ٠,٦٤٧ جرام

كتلة الرماد = ٠,٢٠٥ جرام

النسبة المئوية للرطوبة = (٠,٠٢٥ x ١٠٠) / ٢ = ١,٢٥%

النسبة المئوية للمواد المتطايرة = (٠,٦٤٧ x ١٠٠) / ٢ = ٣٢,٣٥%

نسبة الرماد = (٠,٢٠٥ x ١٠٠) / ٢ = ١٠,٢٥%

نسبة الكربون المثبت = ١٠٠ – (١,٢٥ + ٣٢,٣٥ + ١٠,٢٥)

= ٥٦,١٥%

مثال:

استخدم واحد جرام من الفحم في قنبلة قياس السعر الحراري لتعيين القيمة الحرارية. القيمة الحرارية للفحم وجد أنها ٨٨٠٠ سعر/الجرام. الرماد المكون في قنبلة مقياس السعر الحراري تم استخلاصه بالحامض ثم تم تسخين استخلاص الحامض (Extracted) مع محلول نترات الباريوم وتم الحصول على راسب من كبريتات الباريوم. تم ترشيح الراسب وتجفيف ثم وزنه. وزن الراسب وجد أنه ٠,٠٨ جرام.

احسب نسبة الكبريت في عينة الفحم.

الحل:

نسبة الكبريت في عينة الفحم = (وزن راسب $BaSO_4$ x ٣٢ x ١٠٠) / (٢٣٣ x وزن عينة الفحم في القنبلة)

$$= \frac{٠,٠٨ \text{ جرام} \times ٣٢ \times ١٠٠}{٢٣٣ \times ١ \text{جرام}} = ١,٠٩٨\%$$

مثال:

تم تحليل عينة من الفحم، وكان غاز NH_3 المنبعث تم امتصاصه في ٥٠ سم^3 من ٠,١ عـياري H_2SO_4. بعد الامتصاص الحامضي الزائد (المتبقي) تطلب للتعادل ٦,٢٥ سم^3 مـن ٠,١ عياري (NaOH) ٢,٦٠ جرام من الفحم في التحليل الكمي أعطت ٠,١٧٥٥ جرام من $BaSO_4$.

احسب نسبة N ، S في عينة الفحم.

الحل:

٦,٢٥ سم^3 من ٠,١ عياري إيدروكسيد الصوديوم (0.1 N NaOH)

= ٦,٢٥ سم^3 من (0.1N H_2SO_4).

إذن حجم H_2SO_4 المستخدم لمعادلة NH_3 الصاعدة

= ٥٠ سم^3 من ٠,١ عياري – ٦,٢٥ سم^3 عياري H_2SO_4

= ٤٣,٧٥ سم^3 من ٠,١ عياري H_2SO_4

$$\text{نسبة النيتروجين} = \frac{\text{حجم } H_2SO_4 \text{ المستخدم} \times \text{العيارية} \times ١,٤}{\text{وزن عينة الفحم}}$$

$$= \frac{٤٣,٧٥ \times ٠,١ \times ١,٤}{١,٥٦} = ٣,٩٢٦\%$$

$$\text{نسبة الكبريت} = \frac{\text{وزن راسب } BaSO_4 \times ٣٢ \times ١٠٠}{٢٣٣ \times \text{وزن عينة الفحم}}$$

$$= \frac{٠,١٧٥٥ \times ٣٢ \times ١٠٠}{٢٣٣ \times ٢,٦٠} = ٠,٩٢٧\%$$

٤- كربنة الفحم (صناعة الكوك)

Carbon ation of Coal (Manifacture of Coke)

كربنة الفحم هي عملية تسخين الفحم في معزل عن الهواء، إلى درجة حرارة عالية، تكفي لإحداث تحلل في الفحم وإنتاج متبقي غني بمحتواه من الكربون أكثر من الوقود الأصلي. هذا المتبقي يكون لامعا، كثيف، قوي ومسامي وفي شكل كتلة مدمجة ويعرف بالكوك. بمعنى آخر فإن عملية تحويل الفحم إلى كوك تسمى كربنة.

الفحم الكوكي وفحم الكوك: (caking and Coking of Coals)

يجب التأكيد على أن كل أنواع الفحم لا يمكن تحويلها إلى الكوك. بعض أنواع الفحـــم لـــه استعداد ليلين وينتفخ عند درجات الحارة العالية، ليكون كتلة صلبة مدمجة ذات بـــناء مسامي. هذا النوع من الفحم يسمى ا لفحم الكوكي (Caking Coals). المتبقي يسمى الكوك (Coke). أما إذا كان المتبقي صلب وأقوى من الفحم الذي تكون منه فإنه يـــسمى فحـــم الكوك (Coking Coal). هذه الصفة توجد فقط في نوع الفحم البيتوميني، ولـــذلك فإن الفحم الذي يمكن تكويكه هو الفحم البيتوميني فقط. فحم الأنثراسيت، فحم اللجنـــيت والفحم البيتوميني المتدني (Sub-Bituminous) هذه أنواع من الفحم لا تتحول إلى الكوك. كل أنواع فحم الكوك هي فحم كوكي، ولكن قليل فقط من الفحم الكوكي يقع تحـــت تـــصنيف فحم التكويك (Coking). عموما، الفحم المحتوي على نسبة عالية من المـــواد المتطايرة يكون غير مناسبا للتكويك ويستخدم في إنتاج الغاز. الفحم المحتوي على ٢٠ – ٣٠% من المواد المتطايرة هو فحم جيد لإنتاج الكوك.

طريقة الكربنة:

أولا يتم التخلص من الرطوبة والمحتوى من الغازات.

عـــند حوالي ٢٦٠ °م – ٢٧٠ °م الكربون والماء و H_2S وبعض المواد العضوية ذات الوزن الجزيئي المنخفض مثل (Alkenes, Alkanes) تنبعث.

عند حوالي ٤٠٠ °م فإن الفحم الكوك (Caking) يصبح لين ولدن.

عند حوالي ٧٠٠ °م ينبعث الهيدروجين.

عند حوالي ٨٠٠ °م تنبعث المنتجات الغازية الرئيسية.

الغازات المنبعثة تكون الكتلة اللدنة، تعمل على تمددها لتعطي شكل الفوم (الرغاوي).

عند درجة حرارة أعلى هذه الكتلة التي تشبه الفوم تتصلب لتكون كتلة صلبة ذات بناء مسامي والذي يسمى الكوك.

أنواع الكربنة

خواص الكوك المنتج تعتمد أساسا على نوع الفحم المستخدم، درجة حرارة الكربنة ومعدل الكربنة. طبقا لدرجة الحرارة، فإن الكربنة تكون من نوعين:

- كربنة درجة الحرارة المنخفضة.
- كربنة درجة الحرارة العالية.

كربنة درجة الحرارة المنخفضة:

عند عمل التقطير الإتلافي للفحم عند درجات حرارة ما بين ٥٠٠ – ٧٠٠ °م، فـإن هـذا يسمى كربنة درجة الحرارة المنخفضة. هذه العملية تتم لإنتاج شبه الكوك (semi-coke) والذي يسمى الكوك اللين أو تفحم (char).

إنتاجية الكوك تكون حوالي ٧٠ – ٨٠%. الكوك المنتج بهذه الطريقة يحتوي على ٥ – ١٥% مواد متطايرة وليس قوي بما يكفي لاستخدامه كوقود ميتاليرجي.

المنتجات المختلفة للكربنة منخفضة ذات الحرارة هي شبه الكوك، (semi coke)، القار مـنخفض درجة الحرارة، غاز وكحول خام عند الحرارة القليلة. نوعية وإنتاجية لهذه المنـتجات يـتوقف على الطريقة المستخدمة والفحم المستخدم. مصانع الكربنة عند درجة الحرارة المنخفضة من الطبيعي أنها تستخدم الفحم برتبة منخفضة. هذه الأنواع من الفحم ذات الرتبة المنخفضة تنتج دخان كثيف عند الحرق، ولكن الكوك المنتج منهم يكون وقود نظيف.

شـبه الكوك من الكربنة عند درجات الحرارة المنخفضة يمكن حرقه بسهولة إلـى لهب بدون دخان. وهو يعتبر وقود منزلي مثالي. الغاز الذي يتم الحصول عليه

كمنتج ثانوي له قيمة حرارية أعلى، حوالي ٦٥٠٠ – ٩٥٠٠ كيلو سعر حراري/ الكيلو جرام. إنتاجية الغاز ١٣٠ – ١٥٠ متر مكعب من كل طن من الفحم المكربن ويشكل وقود قيم. القار الذي يتم الحصول عليه كذلك كمنتج ثانوي يحتوي على كثير من الهيدروكربونات البارافينية وكمية قليلة من الهيدروكربونات الأروماتية، مع الفينولات العالية ومختلف المركبات النيتروجينية المستبدلة.

الكربنة عند درجة الحرارة العالية:

كربنة الحرارة العالية هي عند درجة حرارة من ٩٠٠ – ١٢٠٠ °م. تستخدم كربنة درجة الحرارة العالية لإنتاج الكوك المتياليرجي النقي، الصلب، القوي والمسامي المحتوي على ١ – ٣ % من المواد المتطايرة. إنتاجية الكوك هي من ٦٥ – ٧٥%. المنتجات الثانوية – الغاز والقار له كميات أكبر من الهيدروكربونات الأروماتية (Aromatic). الغاز الذي يتم إنتاجه له قيمة حرارية منخفضة حوالي ٥٠٠٠ – ٦٠٠٠ كيلو سعر حراري/ المتر المكعب أقل من ذلك المنتج بواسطة الكربنة عند درجة الحرارة المنخفضة، ولكن إنتاجية الغاز أعلى (٣٧٠ – ٤٨٠ م^{3}/ الطن). تكوين كميات أقل من البارافينات وكميات أعلى من الغاز، تبين أن تكسير مركبات البارافين الموجود في الفحم يحدث عند درجة حرارة مرتفعة، بما ينتج عنه تكون الغازات وزيادة الأروماتية (Aromatization). الكوك المنتج أكثر صلابة عن الكوك المنتج بواسطة الكربنة عند درجة الحرارة المنخفضة، ولذلك فإنه يسمى الكوك الصلب (Hard coke). وهو يستخدم كوقود في الصناعة وكذلك في الاستخدام المنزلي.

جدول ( ) مقارنة للكربنة منخفضة درجة الحرارة وعالية درجة الحرارة

الخاصية	الكربنة منخفضة درجة الحرارة	الكربنة عالية درجة الحرارة
١- درجة حرارة الكربنة	٥٠٠ – ٧٠٠ °م	١٠٠٠ – ١٢٠٠ °م
٢- الإنتاجية	٧٥ – ٨٠%	٦٥ – ٧٥%
٣- المواد المتطايرة	٥ – ١٥%	١ – ٣%
٤- القوة الميكانيكية	ليست قوية ميكانيكيا	قوية ميكانيكيا
٥- الصلابة	كوك لين	كوك صلب
٦- الاستخدام	للأغراض المنزلية	للأغراض الميتاليرجية
٧- إنتاجية الغاز	منخفض (١٣٠–١٥٠م³/الطن)	مرتفع (٣٠٠ – ٣٩٠ م³/الطن)
٨- القيمة الحرارية للغاز	مرتفعة (٦٥٠٠–٩٥٠٠كيلوسعر/م³)	منخفضة(٥٤٠٠–٦٠٠٠ كيلوسعر/م³)
٩- نسبة الهيدروكربونات بالتسلسل المستقيم في المنتجات الثانوية (قار وغاز)	مرتفعة	منخفضة
١٠- نسبة المواد الأروماتية في المنتجات الثانوية.	منخفضة	مرتفعة
١١- الدخان المنتج عند الحرق	بدون دخان	منتج الدخان

٥- الكوك الميتاليرجي: Metallugical Coke

خواص الكوك تتوقف على المسامية، القدرة على التفاعل (Reactivity)، وكمية المـــادة المتطايـــرة المحتجزة في الكوك أثناء الكربنة. يستخدم الكوك أساسا كمصدر للحرارة وكعامل اختزال في الميتاليرجي (الصناعات المعدنية). الكوك الجيد المستخدم في العمليات الميتاليرجية يجب أن يحقق المتطلبات الآتية:

النقاء:

الكـــوك الميتاليرجي يجب أن يحتوي على أقل نسبة من الرطوبة والرماد والكبريت والفوســـفور. الرطوبة تقلل القيمة الحرارية بينما الرماد يعيق التسخين وكذلك يحد من مرور الهواء ويقلل معدل الاحتراق. نسبة الرماد العالية تساعد كذلك في تكوين الخبث (slag).

فـــي حالـــة وجـــود الكبريت والفوسفور فإن ذلك له تأثير سلبي على المنتج الذي يتم إنتاجه.

المسامية Porosity:

يجــب أن يكــون الكوك مسامي لتوفير الالتصاق بين الكربون والأكسجين والذي يؤكد الحرق التام المتقن للوقود في الفرن.

القوة Strength:

الكوك المستخدم في العمليات الميتاليرجية يجب أن يكون له قوة عالية ليمكنه تحمل وزن الخام، مادة خفض درجة حرارة الانصهار (Flux)...الخ في الفرن.

الحجم:

الكــوك الميتاليرجــي يجب أن يكون بحجم متوسط – ليس كبيرا جدا وليس صــغيرا جــدا. الحجــم الكبير للكوك لا يعطي تسخين متجانس بينما في حالة الحجم الصغير جدا، فإنه يمكن أن يسبب الانسداد.

سهولة الحرق Combustibility:

يجب أن يحترق الكوك بسهولة. قابلة الكوك للحرق تتوقف على طبيعة الفحم، درجــة حرارة الكربنة ودرجة حرارة التفاعل. الفحم ضعيف الكوكي أو لا يحدث له كوكــي (Non caking) يكــون أكثر قابلية للاحتراق مقارنة بفحم الكوك القوي. درجة حــرارة الكربنة المنخفضة تنتج كوك سهل الاحتراق مقارنة بذلك المنتج بالكربنة عند درجة الحرارة العالية. ولكن عند درجة حرارة الحرق العالية (٨٠٠ – ٩٠٠ ° م) فإن كــل الكــوك لـــه استعداد للحرق متماثل تقريبا. عند درجة حرارة حول ١٠٠٠ °م ، يتوقف معدل الحرق على معدل الإمداد بالهواء.

القيمة الحرارية: (colorific value)

القيمة الحرارية يجب أن تكون مرتفعة.

القدرة على التفاعل: (Reactivity)

القدرة على تفاعل الكوك يعني بها قدرته على التفاعل مع CO_2، البخار، الهواء أو O_2. القــدرة علــى التفاعل يجب ألا تكون مرتفعة جدا. ولكن الكوك المستخدم في إنتاج غاز الماء (water gas – وهو مزيج من الهيدروجين وأول أكسيد الكربون) يجب أن يتفاعل مع بخار الماء. التفاعل مع CO_2 يمثل اختزال CO_2 طبقا للمعادلة:

$$CO_2 + C \leftrightarrow 2\,CO$$

(غاز) (صلب) (غاز)

وله أهمية في صناعة غاز الإنتاج (Producer gas).

تصنيع الكوك الميتاليرجي:

الكوك المطلوب للأغراض المتياليرجية يمكن إعداده بطريقتين وهما:

١. فرن خلية النحل (Bee hive oven)

٢. فرن أوتوهوفمان (OttoHoffmann Oven)

فرن خلية النحل: شكل (١/٥)

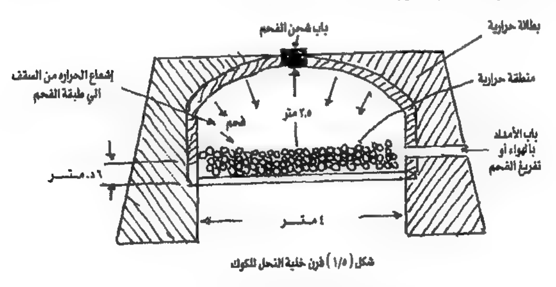
بـنهاية القــرن التاسع عشر، كانت كل متطلبات الكوك الميتاليرجي للعالم تم توفيــرها بتصنيع الكوك في أفران خلية النحل. فرن خلية النحل عبارة عن غرفة من الطــوب الحراري له بناء في شكل القبو. وهي تشبه خلية النحل. أبعاد الفرن هي ٤ متــر عــرض، ٢,٥ متــر ارتفاع. السقف مزود بفحتة لدخول الفحم من أعلى. فتحة أخــرى وهي فتحة التصريف توجد في محيط الجزء السفلي من الحائط. يتم بناء عدد مــن الأفــران في صف بحوائط مشتركة بين الأفران المتجاورة. يتم إدخال الفحم من الفتحة العليا في القبو وينتشر بالتساوي على الأرضية لتكوين طبقة بعمق حوالي ٦٠ – ٩٠ ســم. يــتم أولا إدخـــال بعض الهواء لحرق الفحم. تبدأ الكربنة وتحترق المواد المتطايــرة داخل الباب الجانبي الغلق جزئيا. تستمر الكربنة من القمة للشحنة إلى قاع الشحنة. وتتم في يومين أو ثلاث أيام. يتم توفير الحرارة بحرق المواد المتطايرة ولذلك

لا يتم استعادة منتجات ثانوية. الغازات العادمة يسمح لها بالخروج إلى الجو. بعد نهاية الكـربنة، يـتم تبـريد الكوك الساخن (quenched) بالماء وتفريغه يدويا خلال الباب المنـزلق. حوائط وسقف الفرن الفارغ تحتفظ بحرارة كافية لبدء كربنة الشحنة التالية. إنتاجـية الكـوك هـو حوالي ٨٥% من شحنة الفحم. يمكن تشغيل العملية اقتصاديا باسـتخدام سلـسلة من الأفران بحيث أن غازات الفرن الساخن التي تنطلق إلى الجو تستخدم في حرق الشحنة في الفرن المجاور.

سلبيات أفران خلية النحل:

- لا يـتم اسـتعادة المنتجات الثانوية والتي هي كيماويات مفيدة حيث يسمح لها بالصرف في الجو.
- انخفاض إنتاجية الكوك بسبب الاحتراق الجزئي.
- عدم مرونة العملية.

علـى الـرغم من السلبيات السابقة، فإن أفران خلية النحل ما تزال تستخدم بسبب قلة تكلفتها الرأسمالية والجارية.



شكل (١/٥) فرن خلية النحل للكوك

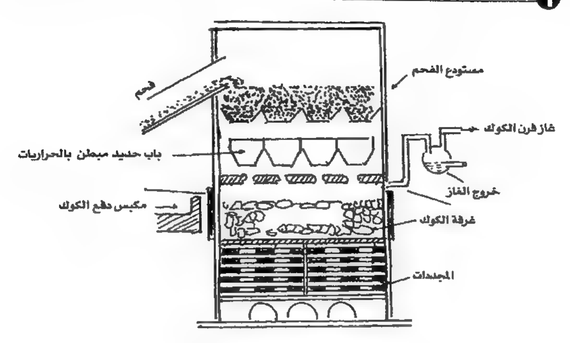
فرن أوتوهوفمان المنتج الثانوي: شكل (١/٦)، (١/٧)، (١/٨)

فـرن خلـية النحل تم استبداله بأفران الحجرة في معظم الحالات وهذه تعمل

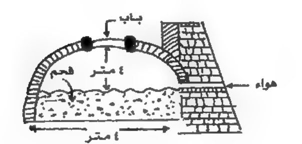
بمــبدأ الاســترجاع لاقتــصاديات الحرارة، أي استخدام الفقد في حرارة غازات عادم الوقود لتسخين الطوب.

الإنشاء:

فـرن أوتوهوفمان يتكون من عدد من الغرف الضيقة المستطيلة المصنعة من طوب السيليكا. الغرف متلاصقة بما لا يمكن من دخول الهواء. أعلى كل غرفة توجد ثـلاث فتحات للتغذية بالفحم. كل غرفة مجهزة بفتحة لسحب الهواء وباب من الحديد الزهـر المـبطن بالحراريات عند كل نهاية لتصّريف الكوك. غرف الكربنة هذه تنشأ جنـبا إلى جنب مع وجود مداخل رأسية أو مساحة داخلية للحرق فيما بينهم. الأفران (الغـرف) تكـون فـي شكل بطارية من ١٠ إلى ١٠٠ فرن. الفرن الواحد قادر على احتواء ١٢ إلى ٢٤ طن من الفحم.



شكل (١/٦) مخطط يوضح غرفة واحدة من غرف اوتوهوفمان



شكل (١/٧) فرن خلية النحل

أشكال (١/٦)، (١/٧)

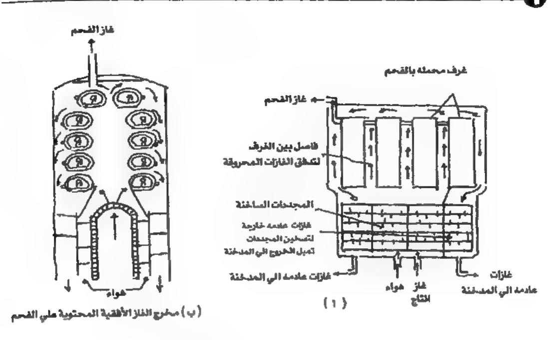
العمل: (Working) شكل (١/٨)

يـــتم إدخـــال الفحـــم إلى الغرفة ثم قفل الغرف بإحكام عند كلا الجانبين. يتم تسخين أفران الكوك إلى ١٢٠٠ ° م بحرق الوقود الغازي (عادة غاز فرن الكوك). يـــستخدم مبدأ الاسترجاع لتحقيق التسخين الاقتصادي ما أمكن ذلك. الغازات العادمة المنـــتجة أثناء الحرق يتم تمريرها خلال المسترجعات (Regenerators) ثم عندئذ تترك

إلـــى الجـــو خلال المدخنة. تبني المسترجعات أسفل الأفران. الغازات العادمة تمرر حـــرارتها الملموسة إلى المباني من الطوب للمسترجعات حتى ارتفاع درجة الحرارة إلـــى ١٠٠٠ °م، سريان غازات التسخين العادمة يتم عندئذ انعكاسها والغازات الداخلة (وقـــود غـــاز + هـــواء) المـــستخدمة فـــي الحـــرق يتم تمريرها خلال بناء الطوب للمـــسترجعات التـــي تم تسخينها. لذلك فإن الغازات الداخلة يتم تسخينها المسبق قبل الدخول إلى المساحة الداخلية للحرق. بعد بعض الوقت يتم انعكاس تدفق الغازات مرة أخـــرى بحـــيث أن عـــادم غازات الحريق تقوم بتسخين بناء الطوب ثانيا. بذلك فإن المـــسترجعات تعمل بمبدأ دورات التسخين والتبريد. وهذا يتحقق بتغيير اتجاه سريان الغازات خلال المداخل الرأسية من وقت إلى آخر كل حوالي ٣٠ دقيقة.

يـــستمر تـــسخين الأفـــران حتى توقف تصاعد المواد المتطايرة تماما. عملية الكربنة تتم طبقة بطبقة في شحنة الكوك بدءا من حائطي الأجناب للفرن متحركا نحو المركز. كربنة شحنة الفحم تستغرق حوالي ما بين ١١ – ١٨ ساعة. بعد تمام العملية يـــتم دفـــع الكوك الأحمر الساخن إلى الخارج بواسطة مكبس (كباس) كهربي. يسقط الكوك في عربة التبريد. إنتاجية الكوك هي حوالي ٧٥%.

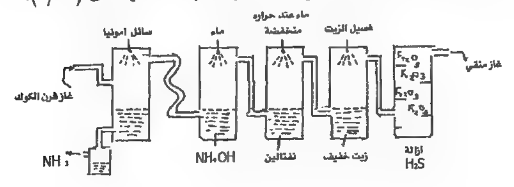
تبـــريد الكـــوك الأحمـــر الساخن يتم برش الماء (التبريد الرطب) أو بتمرير غـــازات خاملـــة من الغلايات (تبريد جاف). التبريد الجاف له مميزات تفوق التبريد الـــرطب لأن الكوك المنتج يكون أكثر كثافة وقوة. بالإضافة إلى أنه في حالة التبريد الرطب تفقد الحرارة الملموسة للكوك بينما في التبريد الجاف فإن الغازات الخاملة بعد تبريد الكوك تصبح ساخنة وعندئذ يتم تدويرها إلى الغلايات حيث يتم التسخين المسبق لمياه تغذية الغلاية ثم إعادة لتدوير لتبريد الشحنة الجديدة من الكوك.



شكل (١/٨) منتجات فرن الكوك لأوتوهوفان

٦- استعادة المنتجات الثانوية: (Recovery of by Products)

الغازات والأبخرة الصاعدة عند الكربنة في أفران الكوك لا يتم خلطها مع الحرق حيث يـــتم جمعها منفصلا. الغاز المعروف بخار فرن الكوك يتم معالجته مستقلا لاستعادة المنتجات الثانوية القيمة. أو لا يتم السماح للغاز الذي يكون عند درجة حرارة مرتفعة بعمـــل فقاعات(to bubble) خلال الماء في خط هيدروليكي رئيسي، الذي يعمل كعازل للماء ويمنع مرور الغازات ثانيا إلى المعوجة (retort) عند فتحها شكل (١/١٠).



شكل (١/٩) مخطط لوحدة معالجة غاز فرن الكوك

(١) استعادة القار (Revovery of tar)

يتم مرور الغاز من أفران الكوك خلال برج الذي يتم فيه رش سائل الأمونيا. يــتم تجمــيع القــار والغــبار في الحوض. الحوض يتم تجهيزه بلفائف من المواسير للتسخين لاستعادة الأمونيا ثانيا. يتم استخدام الأمونيا ثانيا. قار الفحم (coal tar) مصدر ثمــين للكيماويات. القار المنتج يتم تقطيره لإنتاج عدد من المنتجات مثل خام البنزول (crude benzol)، المــركبات الفينولــية، النافتا الثقيلة (heavy naphtha)، زيت الأنثرا كينون، أساس مذيب البيريدين الأولي (pyridine)....الخ.

(٢) استعادة الأمونيا: (recovery of ammonia)

يلــي ذلك، يتم عندئذ تمرير الغازات خلال برج حيث يتم رش المياه لاستعادة الأمونيا. يمكن كذلك إزالة الأمونيا بإذابتها في H_2SO_4 لتكوين $(NH_4)_2SO_4$، حيث يستخدم عــندئذ كسماد. إزالة الأمونيا من الغاز ضروري وإلا فإنها يمكن أن تسبب انسداد في مواسير الغاز في شكل $(NH_4)_2CO_3$.

(٣) استعادة النفثالين: (recovery of naphthalene)

يــتم تمرير الغازات خلال برج تبريد، حيث يتم رش مياه عند درجة حرارة منخفضة. يتم غسيل الغاز بالماء حتى انخفاض درجة حرارته. يحدث تكثف للنفثالين هنا حيث يتم جمعه مع الماء واستعادته.

(٤) استعادة البنزول (recovery of benzol)

(البنــزول هــو خام بنزين ذو خصائص مانعة للخبط). لاستعادة البنزول يتم إدخــال الغازات في زيت خفيف أو مغسلة (scrubber) للبنزول، حيث كلا من البنزين (C_6H_6) وأشباهه يتم إزالته ويتم جمعه عند القاع. زيت الغسيل مع أشباه البنزين يعرف بالــزيت الخفــيف (light oil). (الــزيت الخفــيف أخف من الماء ولذلك سمي بالزيت الخفــيف). وهــو خلــيط من الهيدروكربونات ذات درجة حرارة الغليان المنخفضة، والبنزين، أشباه البنزين والمذيب المستخدم في الغسيل. المذيب عبارة عن خليط من كل مــن المركبات الآتية (methyl ethyl benzene, trimethyl benzene.etc) فصل المكونات

المخـــتلفة للـــزيت الخفيف يتم بواسطة التقطير. المذيب يتم استعادة إلى وحدة الغسيل (scrubber).

(٥) استعادة (H2S):

H_2S ومـــركبات الكبريت الأخرى يتم إزالتهم من غاز فرن الكوك بعد فصل الزيت الخفيف.

مركبات الكبريت الموجودة في غاز الفحم يجب إزالتها لأن الكبريت وأكاسيد الكبريت SO_2، SO_3 تساعد في التآكل. أضف إلى ذلك أن H_2S له رائحة كريهة.

لإزالـــة الكبـــريت، H_2S الغاز، يتم تمرير الغاز خلال غرفة مملوءة (packed) بأكسيد الحديديك (Fe_2O_3) الرطب، والذي يتفاعل مع H_2S لإعطاء (Fe_2S_3).

$$Fe_2O_3 + 3H_2S \rightarrow Fe_2O_3 + 3H_2O$$

بعد بعض الوقت عند تحول كل Fe_2O_3 إلى Fe_2S_3 ، يتم تعريض المنقي (purifier;) إلى الجو حيث يتأكسد Fe_2S_3 إلى الأكسيد.

$$2Fe_2S_3 + 4O_2 \rightarrow 2FeO + 3SO_2\uparrow$$

$$4FeO + O_2 \rightarrow 2Fe_2O_3$$

SO_2 الـــناتج يمكن استخدامه في صناعة حامض الكبريتيك والذي يمكن استخدامه في امتصاص NH_3 من غاز الفحم. غاز فرن الكوك المنقي يتم أخيرا تخزينه فوق الماء في مستودع حامل للغاز (holder). وهو يستخدم غالبا كوقود منزلي حيث يكون سعر الفحم رخـــيص. المكونات الرئيسية لغاز الفحم أو غاز فرن الكوك هي CH_4 ، H_2 مع نسبة قليلة من CO_2، CO ، N_2، O_2.

الفصل الثالث

3

الوقود السائل
Liquid Fuels

الوقود السائل يستخدم حاليا على نطاق واسع في المجالات الصناعية والمنزلية. أهمية الوقود السائل يتم إدراكها من حقيقة أن محركات الاحتراق الداخلي تستخدمه. استخدام الوقود السائل في أفران توليد الحرارة زاد بمعدل كبير.

أكبر مصدر للوقود السائل هو البترول. القيمة الحرارية للبترول هي حوالي ٤٠٠٠٠ كيلو جول/ الكيلوجرام. رغم أن البترول يمثل الجزء الكبير من الوقود السائل، إلا أن المصادر الأخرى تساعد في الإمداد بالوقود السائل مثل قار الفحم، البنزول الخام (crude benzol)، الوقود السائل المخلق من الفحم...الخ.

١-البترول:

كلمة بترول تعني "زيت الصخر- rock oil" في اللغة اللاتينية petra تعني الصخر، oleum تعني الزيت. وهو يسمى كذلك الزيت المعدني (mineral oil). البترول خليط معقد من الهيدروكربونات البارافينية والأوليفينية والأروماتية (parraffinic, olefenic, aromatic) مع محتوى بكميات صغيرة من المركبات العضوية.

أ- أصل البترول:

هناك العديد من النظريات لشرح أصل البترول، وسيتم مناقشة بعض من هذه

النظريات.

نظرية مندليف:

طبقا لنظرية مندليف (١٨٧٦) في أن البترول هو من أصول غير عضوية.وهو تكون بفعل أداء الماء على الكربيدات المعدنية (metallic carbides). الكربيدات المعدنية تكونت بتفاعل المعدن مع الكربون تحت ظروف درجة الحرارة المرتفعة والضغط المرتفع داخل الأرض.

$4Al + 3C \rightarrow Al_4C_3$

$Al_4C_3 + 12H_2O \rightarrow 4Al(OH)_3 + 3CH_4$

$Ca + 2C \rightarrow CaC_2$

$CaC_2 + 2H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + C_2H_2$

الهيدروكربوانت التي تكونت بهذا الشكل يمكن أن يحدث لها هدرجة أو بلمرة لتكوين أنواع مختلفة من الهيدروكربونات.

$C_2H_2 + H_2 \xrightarrow{H2} C_2H_4 \rightarrow C_2H_6$

$3C_2H_2 \xrightarrow{\text{بلمرة}} \square\ C_6H_6$

لذلك، ينتج خليط من البارافينات، الأولوفينات، الأروماتيك. هذه النظرية أيدها مواسون الذي ادعى تحضير سائل يشبه ذلك للبترول، بفعل الماء على كربيد اليورانيوم. ولكن هذه النظرية فشلت في شرح وجود مركبات النيتروجين والكبريت، المركبات ذات النشاط البصري...الخ في البترول.

نظرية إنجلر:

طبقا لهذه النظرية يكون البترول من أصل عضوي. فهي تقترح أن البترول يتكون بالتقطير الإتلافي للحيوانات البحرية الميتة، والحيوانات الميتة....الخ، داخل الأرض تحت الضغط العالي ودرجة الحرارة العالية. حطام الحيوان يمكن أن تكون قد تحللت بفعل البكتريا اللاهوائية تحت هذه للظروف. إنجلر كان قادرا على تحضير

منتج مشابه للبترول محتويا على مركبات النيتروجين والكبريت وكذلك المركبات ذات النشاط البصري بالتقطير الإتلافي لزيت السمك. وجود الماء المالح مع البترول يؤيد هذه النظرية. ولكن، هذه النظرية لم توفق في شرح وجود الكلوروفيل (الموجود في النبات) في البترول.

النظرية الحديثة:

طبقا لهذه النظرية، فقد اقترح أن البترول يتكون بسبب تحلل النباتات وكذلك الحيوانات الميتة. المادة العضوية الميتة من النبات أو الحيوان التي ترسب إلى قاع البحر الضحل والبحيرات والبرك. هذه المخلفات التي ترسب تتحلل بواسطة البكتريا اللاهوائية. معظم المركبات العضوية يتم تدميرها وفقدها. الزيوت الدهنية الغير مشبعة والأحماض التي تساعد على حياة البكتريا يحدث لها بلمرة. هذه تدفن تحت غطاء من الصخر حيث البكتريا تسبب لهم التحلل. في هذه العملية، المحتوى من الماء يقل من ٧٠% إلى ١٠% أو أقل نتيجة استمرار التحلل بفعل البكتريا، تحدث عمليات مختلفة من (Decarboxylation) حيث تحول المواد العضوية إلى البترول.

النظرية الحديثة تشرح وجود مركبات النيتروجين والكبريت. وجود الكلوروفيل والهيموجلوبين في البترول يتضح بحقيقة أن مصدر الكلوروفيل هو النبات وأن مصدر الهيموجلوبين الموجود في البترول هو الحيوانات البحرية. النظرية كذلك تشرح وجود المركبات ذات النشاط النظري. وجود الماء المالح والفحم قريبا من البترول يؤكد كذلك صحة النظرية الحديثة.

٢- مكونات البترول:

البترول الخام من مختلف الأماكن له مكونات تختلف خلال مجال ضيق. التحاليل الكلية أظهرت أن متوسط مكونات البترول هي من العناصر الآتية:

العنصر	C	H_2	S	O_2	N_2
النسبة المئوية	٨٠ – ٨٧	١١.١ – ١٥	٠,١ – ٣,٥	٠,١ – ٠,٩	٠,٤ – ٠,٩

رماد البترول الخام هو فقط ٠,١% أو أقل. عمليا وجدت جميع المعادن في رماد البترول. أكثر المعادن الموجودة تشمل الحديد والألومنيوم والكالسيوم المغنسيوم والنيكل بالإضافة إلى عنصري السيليكون والصوديوم.

البترول الخام هو أساسا خليط من مختلف الهيدروكربونات. معظم الهيدروكربونات هي ذات التسلسل المستقيم أي (straight chain) من الهيدروكربونات البارافينية وكذلك الأروماتية مثل البنزين، التولوين والنفثالين...الخ. الألوفينات والأسيتيليينات (acetylenes) غير موجودة في الزيت الخام. ولكن أثناء تصنيع البترول تتكون الأولوفينات.

الكبريت يوجد في شكل مشتقات الهيدروكربونات مثل (alkylsulphides)، (aromatic sulphides) ....الخ. النيتروجين موجود في شكل مشتقات (Pyridine)، (Quinoline)، (Pyrrole)....الخ. الأكسجين المتحد يوجد في شكل أحماض الكربوكسيليك (carboxylic) مثل (naphthalenic acids)، الكيتونز والفينولات. الرائحة المنفردة للبترول الخام ترجع إلى وجود مركبات الكبريت فيه.

تقسيمات البترول الخام:

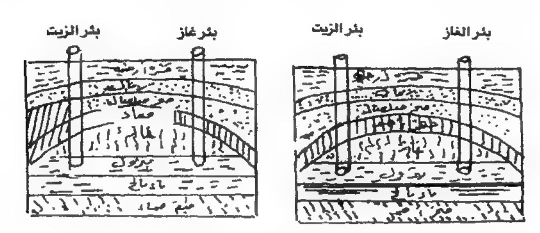
النسبة التي توجد بها الهيدروكربونات من البارافينات، الألوفينات والأروماتيك في البترول تختلف من مكان إلى آخر حيث تم استخراج البترول. على أساس المتبقي الذي يوجد بعد التقطير فإن البترول الخام يمكن تقسيمه كما في الجدول التالي.

جدول ( ) تقسيم أنواع البترول الخام

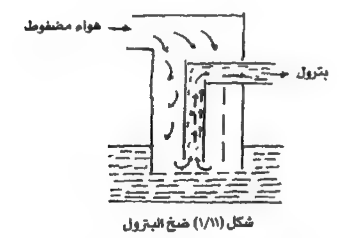
متخلفات بعد التقطير	الاسم	المحتويات	ملاحظات
شمع البارافين	بارافين الأساس	هيدروكربونات تسلسل مستقيم وكميات قليلة من النفثالين والهيدروكربونات الأليفاتية	يوفر رقم أوكتيني منخفض وجازولين يسيل في مسار ضيق strait run gasoline
الأسفلت	أسفلت الأساس	هيدروكربونات أروماتية ونفثالينيك cycloparraffines	يوفر رقم أكتين عالي وجازولين يسيل بسهولة
شمع بارافين وأسفلت	ذو أساس مختلط	بارافينات، نفثينات و هيدروكربونات أروماتية	يوفر جازولين متوسط الدرجة ثم السيول في المسار الضيق

تصنيع الزيت الخام: شكل (١/١٠) ، شكل (١/١١)

يوجد البترول على عمق أسفل القشرة الأرضية. يوجد الزيت طافي فوق الماء المالح أو الماء شديد الملوحة (brine) عموما، يحدث تراكم للغاز الطبيعي فوق الزيت. لرفع الزيت إلى السطح (استخراج الزيت) يتم حفر آبار وإدخال مواسير مستقيمة حتى الصخور الحاملة للزيت. طبيعي أو يندفع الزيت إلى الخارج خلال هذه الفتحات بسبب ضغط الغاز الطبيعي. ولكن مع انخفاض ضغط الغاز الطبيعي يتم ضخ الزيت. باستخدام طلمبة الرفع الهوائي. طلمبة الرفع الهواء تتكون من ماسورتين متحدي المركز، يتم إنزالهم إلى طبقة الزيت. يتم دفع الهواء المضغوط خلال الماسورة الخارجية حيث يتدفق الزيت من الماسورة الداخلية.



شكل (١/١٠) الضخ الميكانيكي للبترول



شكل (١/١١) ضخ البترول

تكرير البترول: (Refining of Petroleum) أشكال (١٢، ١٣، ١/١٤)

الزيت الخام الذي يصل إلى سطح الأرض، يتكون عموما من خليط من المواد الهيدروكربونية الصلبة والسائلة والغازية المحتوية على الرمل والماء. الزيت الخام بهذه الحالة يكون ذو أهمية متدنية. لذلك، فإنه بعد إزالة ما به من الأوساخ والماء وكثيرا من الغاز الطبيعي المصاحب، فإنه يتم فصل الزيت الخام إلى عدد من الأجزاء المفيدة بالتقطير الجزئي (fractional distillation). الأجزاء الناتجة من عملية التقطير الجزئي يتم عندئذ إما تعرضها لعمليات التنقية أو للعمليات التحويلية، وذلك لصناعة

المنتجات المفيدة المختلفة من البترول. كل هذه العمليات تسمى تكرير البترول والمصنع الذي يقوم بهذا العمل يسمى مصنع التكرير.

تكرير البترول يشمل الخطوات التالية:

إزالة الاستحلاب (demulsification)

الزيت الخام المنتج من البئر يكون في شكل مستحلب ثابت من الزيت والماء المالح، والذي يكون بلون ما بين الأصفر إلى البني الداكن. عملية تثبيت المستحلبات ترجع إلى وجود عوامل الاستحلاب في زيت البترول (مثل، أملاح الصوديوم لأحماض النفثينيك naphthenic ، sulfo acids) ....الخ. كذلك المستحلبات تكون ثابتة بسبب الكهرباء الاستاتيكية على الحبيبات المنتشرة مسببة تنافر طبيعي.

يتم إزالة الاستحلاب بعملية (cotterll's process) حيث في هذه العملية يتم إزالة الماء من الزيت بعملية كهربية. يتم تعريض الزيت الخام إلى مجال كهربي، وعند تصادم نقاط الماء الغروي (colloidal water) حيث تتكون نقاط كبيرة والتي تنفصل من الزيت.

إزالة الملوثات الضارة:

زيادة المحتوى من الأملاح مثل Nacl ، $MgCl_2$ يمكن أ يسبب تآكل معدات التكرير، هذه يتم إزالتها بالماء. مركبات الكبريت المنفرة تزال بمعالجة الزيت بأكسيد النحاس. كبريتيد الحديد (copper sulfide) الذي يتكون يتم فصله بالترشيح.

التقطير الجزئي (fractional distillation)

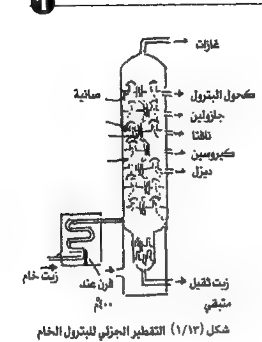
التقطير الجزئي للبترول يتم في برج التقطير العالي بتصميم خاص والمصنع من الصلب. عمليات التقطير الأولي كانت غير مستمرة (Batch processes). في هذه العمليات الغير مستمرة كان التقطير لزيت البترول يتم من أوعية ضخمة حتى يتم فصل معظم الزيت إلى أجزاء. ولكن ألغيت هذه الآن وذلك بسبب زيادة درجة حرارة التشغيل، حيث يحدث تكسير لمختلف الأجزاء. في معامل التكرير الحديثة استبدلت

العلمية الغير مستمرة للتكرير بالعملية المستمرة.

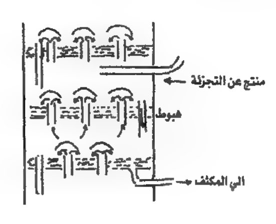
في العملية المستمرة (continuous process):

يتم تسخين الزيت الخام إلى ٣٥٠ – ٣٨٠ °م في فرن أنبوبي بتصميم خاص يسمى المقطر الأنبوبي (pipe still). يتم المحافظة على درجة الحرارة خلال المجال السابق وذلك لتجنب التحلل الحراري للمكونات العالية إلى المنخفضة. يتم تمرير الأبخرة الساخنة من الخام خلال برج التجزئة الطويل والذي يسمى برج الفقاعة (Bubble tower). يتكون هذا البرج من عدد من الصواني الأفقية المزودة بعدد من المداخن الصغيرة التي ترتفع الأبخرة من خلالها. هذه المداخن الصغيرة تكون مغطاة بعدد من الأغطية المتحركة (loose caps) والتي تعرف بأغطية الفقاعة (bubble caps). أغطية الفقاعة هذه تساعد في توفير الالتصاق الجيد بين الأبخرة الصاعدة والسوائل المتحركة إلى أسفل.

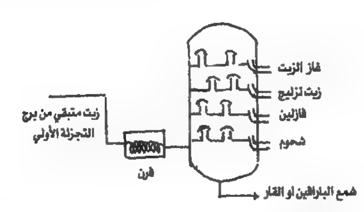
فصل الأجزاء المختلفة مبني على حقيقة أن الهيدروكربونات في زيت البترول تغلي عند درجات حرارة مختلفة. درجة الحرارة في برج. التجزئة تنخفض بالتدريج عند التحرك إلى أعلى (حوالي ٣٠٠ °م عند القاع وتنخفض بالتدريج حتى ١٢٥ °م عند قمة برج التجزئة). مع تصاعد أبخرة الزيت الخام إلى أعلى فإن تصبح أكثر برودة بالتدريج ويحدث تكثف جزئي عند ارتفاعات مختلفة من برج التقطير. الأجزاء ذات درجة حرارة غليان أعلى تتكثف أولا عند الصواني السفلية بينما الأقسام ذات درجة حرارة غليان منخفضة تتكثف على مراحل عند الصواني العليا. لذلك، فإنه يتم فصل الزيت الخام إلى أجزاء مختلفة طبقا لمجال غليانها ويتم جمعها عند ارتفاعات مختلفة في البرج بمساعدة المكثفات. المتبقي في قاع برج التجزئة يتم تقطيره تحت التفريغ لاستعادة أجزاء مختلفة.



شكل (١/١٣) التقطير الجزئي للبترول الخام



شكل (١/١٢) مخطط مبسط للتجهيزة بغطاء الفقاعة



شكل (١/١٤) التقطير بالتفريغ للزيت المتبقي

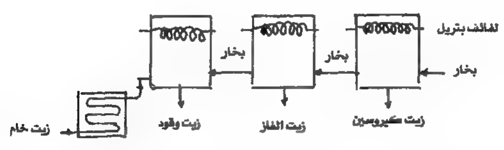
جدول ( ) الأجزاء المنتجة بالتقطير الجزئي لخام البترول

القسم	الغليان	مجال المكونات	الاستخدامات
١- غازات وقود غير مكثفة	< ٣٠ °م	C_4–C_1	وقود منزلي، صناعات الكيماويات العضوية
٢- إيثربترولي متطاير	٣٠ – ٧٠ °م	C_7–C_5	مذيب للدهون والزيوت الأساسية

القسم	الغليان	مجال المكونات	الاستخدامات
			يستخدم في التنظيف الجاف
٣- الجازولين (بنزين)	٤٠ – ١٢٠ °م	C_9–C_5	وقود لمحركات الاحتراق الداخلي ومذيب، للتنظيف الجاف
٤- النافثا أو المذيب الكحولي	١٢٠ – ١٨٠ °م	C_{10}–C_9	كمذيب، للنظافة الجافة. خام للصناعات البتروكيميائية
٥- زيت الكيروسين	١٨٠ – ٢٥٠ °م	C_{16}–C_{10}	الاضاءة، وقود لمواقد السولار لعمل غاز الوقود، الجزء المتطاير اكثر كوقود بثق (jet fuel)
٦- زيت الديزل	٢٥٠ – ٣٢٠ °م	C_{18}–C_{10}	وقود محركات الديزل، كربنة غاز الماء
٧- الزيت الثقيل	٣٢٠ – ٤٠٠ °م	C_{30}–C_{17}	وقود للسفن، الأفران الميتاليرجية، خام لعمليات التكسير
عند التقطير بالتفريغ ينتج الزيت الثقيل *زيت الترليج *هلام البترول		C_{20} - C_{17}	زيت تزليج الفازلين وهو يستخدم في صناعة مستحضرا التجميل والمستحضرات الطبية
*الشحوم			كمواد تزليج
*شمع البارافين		C_{28} - C_{20}	يستخدم لتحضير الشموع، الورق الشمعي، طلاء الأحذية، العزل الكهربي
٨- المتبقي قد يكون من	> ٤٠٠ °م		لرصف الطرق وعزل

القسم	الغليان	مجال المكونات	الاستخدامات
نوعين			الأسقف
*الأسفلت للخام الأسفلتي			كوقود، لقولبة أعمدة
*كوك البترول			الأقطاب

يوجد نوع آخر من التقطير الجزئي يسمى الوميض العلوي (Top flashing). في هذه العملية، يتم تسخين الزيت الخام في فرن ثم مرور الأبخرة خلال أبراج تجزئة مختلفة التي تكون ثابتة عند درجات حرارة مختلفة، لجمع الأجزاء المختلفة. يستمر المحافظة على درجة الحرارة باستخدام لفات من مواسير التبريد. فمثلا، في حالة مرور الزيت الخام خلال البرج الأول، فإن درجة حرارته تظل بحيث يتكثف زيت الوقود عند ا لقاع وبخار المكونات الأخرى تمر إلى البرج التالي، في البرج التالي يستمر كذلك المحافظة على درجة الحرارة بحيث تتكثف أبخرة غاز الزيت عند القاع وهكذا. يتم حقن البخار عند قاع كل برج تجزئة لتأثير ضغطه الجزئي. أبخرة الجازولين أخيرا تمر إلى الخارج من القمة شكل (١/١٥).



شكل (١/١٥) الوميض العادي

التكسير: (cracking)

من بين جميع الأجزاء الناتجة من التقطير الجزئي للبترول الخام، فإن الجازولين (بنزين العربات) يعتبر الأكثر أهمية من بين هذه الأجزاء. مع النمو السريع في صناعة السيارات زاد استهلاك وقود الجازولين أضعافا، ولكن إنتاجية هذا الجزء

من الزيت الخام هي فقط ٢٠%. كذلك فإن نوعية الجازولين المنتج ليست جيدة. هذا الجازولين يسمى الجازولين سهل الانسياب في الأنابيب (straight run gasoline). على الجانب الآخر، فإن إنتاج الأجزاء البترولية الأثقل مرتفع إلى حد ما. لذلك، أصبح من الضروري تحقيق أفضل استفادة من هذه الأجزاء الثقيلة، بتحويلها إلي أجزاء مفيدة، مثل الجازولين. يتم ذلك بتقنية تمسى التكسير (cracking).

عملية التكسير:

عملية التكسير هذه يتم بها تحويل الأجزاء الثقيلة إلى أجزاء أخف باستخدام الحرارة، باستخدام أو بدون استخدام عامل وسيط (catalyst). التكسير يشمل تمزيق أربطة C–C ، C–H في سلسلة الهيدروكربونات ذات الوزن الجزئي العالي. مثل:

$$C_{10}H_{18} \xrightarrow{\text{تكسير}} C_5H_{12} + C_5H_{10}$$

Decane — n-pentance-pentane

غليان ١٧٤مْ — غليان ٣٦ مْ

$$C_8H_{18} \xrightarrow{\text{تكسير}} C_5H_{12} + C_3H_6$$

<u>تقريبا ٥٠%من الجازولين الحالي يتم إنتاجه بالتكسير. يجب التأكيد هنا أن الجازولين المنتج بالتكسير يتفوق كثيرا على البنزين المنتج من برج التقطير مباشرة عملية التكسير تتضمن التغيرات الكيميائية الآتية:</u>

- تحويل الهيدروكربونات الأولى إلى الأدنى أي انقسام الرباط C–C. المنتجات التي يتم الحصول عليها لها درجة حرارة غليان أقل من المادة الأولية.
- تكوين هيدروكربونات ذات سلاسل بفرعات (Branched Chain) من الألكينات (Alkanes) ذات التسلسل المستقيم.
- الهيدروكربونات الغير مشبعة تتكون من الهيدروكربونات المشبعة.
- يمكن أن يحدث تبلر (crystallization)

ولكن، رغم أن الاستخدام الرئيسي للتكسير التجاري هو لإنتاج الجازولين، إلا أنه يستخدم كذلك لإنتاج الألوفينات من النافثا (olefins from naphthas)، غاز الزيت من الكيروسين وخفض لزوجة المتبقي سهل الانسياب (straight run).

التكسير يمكن أن يتم بطريقتين وهما:

(١) التكسير الحراري (thermal cracking)

عند حدوث التكسير ببساطة باستخدام الحرارة والضغط، فإن هذه العملية تسمى التكسير الحراري. الزيوت الثقيلة يتم تعريضها إلى درجة حرارة عالية وضغط مرتفع، عند تكسر الهيدروكربونات العالية لإنتاج جزيئات البارافينات والأولوفينات....الخ. الثبات الحراري بين مكونات أجزاء البترول يزداد حيث البارافينات أقل من النفثينز (naphthenes) أي (alcyclics – المركبات الدهنية الحلقية)، أقل من المركبات الأروماتية (aromatics). المنتجات التي يتم الحصول عليها تتوقف على ظروف التشغيل. التكسير الحراري يمكن أن يتم إما في المجال السائل أو في المجال الغازي.

أ- التكسير الحراري في المجال السائل:

بهذه الطريقة فإنه يمكن تكسير أي نوع من الزيت المتبقي أو زيت ثقيل. يتم المحافظة على الشحنة في الحالة السائلة وذلك باستخدام ضغط مرتفع في المجال من ٣٠ كجرام/ سم^{٢} إلى ١٠٠٠ كجرام/ سم^{٢} عند درجة حرارة مناسبة ٤٧٦ – ٥٣٠ °م. المنتجات التي تم تكسيرها يتم فصلها في برج التجزئة. الأجزاء الهامة هي، جازولين التكسير (٣٠ – ٣٥%) غازات التكسير (١٠ – ٤٥%)، زيت وقود التكسير (المازوت) (٥٠ – ٥٥%). جازولين التكسير له رقم أوكتين حوالي ٧٠. غازات التكسير تحتوي على مواد خام للبتروكيماويات. مخلفات التكسير تستخدم كوقود.

ب- التكسير الحراري في المجال الغازي:

بهذه الطريقة يمكن فقط تكسير الزيوت التي يمكن تبخيرها عند درجات الحرارة المنخفضة. أجزاء البترول ذات مجال الغليان المنخفض مثل الكيروسين، يتم تسخينها إلى درجة حرارة من ٦٧٠ – ٧٢٠ °م عند ضغط منخفض من ١٠ – ٢٠ كجرام/ سم٢. الوقت اللازم للتكسير في هذه العملية أقل كثيرا مقارنة بالتكسير الحراري في المجال السائل. الجازولين (بنزين السيارات) المنتج من تكسير المجال الغازي له خواص مانع الخبط (antiknock) أفضل ولكن أضعف بالنسبة للثبات. عموما التكسير الحراري ينتج جازولين أقل استقرارا وثباتا عن جازولين المنتج من برج تقطير الخام (straight run) بسبب وجود هيدروكربونات عالية غير مشبعة نشطة فيها.

آلية التكسير الحراري:

التكسير الحراري يعتقد أنه يتبع آلية الشق الحر (Free Radical). يمكن تمثيل الآلية بتنشيط (n-nonane) .

$$CH_3(CH_2)_7CH_2 \xrightarrow{\text{حرارة}} CH_3(CH)_3\dot{C}H_2 + \dot{C}H_2 + \dot{C}H_2(CH_2)_2CH_3$$

الإنشطار:

الشق الحر المتكون يكون غير ثابت حراريا ويحدث له انقسام عند (B-position) ينتج شق جديد و أولوفين.

$$CH_3 - CH_2CH_2 - C\vec{H}_2 - \bar{C}H_2 \rightarrow CH_2 - CH_2 - \dot{C}H_2 + CH_2 = CH_2$$

يستمر الانقسام، حتى تكون شق ثابت حراريا.

$$CH_3 - C\vec{H}_2 - \bar{C}H_2 \rightarrow \dot{C}H_3 + CH_2 = CH_2$$

$$CH_3(CH_2)_7CH_3 + \dot{C}H_2 \longrightarrow CH_3(CH_2)_3\dot{C}H - CH_2 - CH_3 + \dot{C}H_4$$

الشق الذي ليس له رباط C–C في الموقع B بسبب وجود شق الهيدروجين الحر.

$$CH_3\dot{C}H_2 \rightarrow CH_2 = CH_2 + \dot{H}$$

أخيرا

$$CH_3\dot{C}H_2 \rightarrow CH_2 = CH_2 + \dot{H}$$

$$\dot{C}H_3 + \dot{C}H_3 \rightarrow CH_3 - CH_3$$

$$2CH_3 - \dot{C}H_2 \rightarrow CH_3 - CH_2 - CH_2 - CH_3$$

$$CH_3 - \dot{C}H_2 + \dot{H} \rightarrow CH_3 - CH_3$$

التكسير بالتحفيز: (catalytic cracking)

التكسير بالتحفيز أو بعامل وسيط حيث يتم التكسير عند درجة حرارة وضغط أقل كثيرا. العامل الوسيط المستخدم هو عادة خليط من السيليكا والألومنيا (سيليكات الألومنيوم المائية). العامل الوسيط الذي يزداد استخدامه حديثا هو الزيوليت (zeolite). نوعية وكمية الجازولين المنتج بالتكسير بعامل وسيط أفضل كثيرا.

يتميز التكسير بالعامل الوسيط عن التكسير الحراري بالمميزات الآتية:

١. في وجود العامل الوسيط لا توجد حاجة لدرجة الحرارة العالية أو الضغط العالي وهذا يحقق خفض في التكاليف.
٢. استخدام العامل الوسيط لا يعجل فقط التفاعلات (تحلل، إزالة الهيدروجين، والأيزميرات والتي تماثل التركيب الكيماوي ولكن تختلف في لخواص الكيميائية (isomerizaton) و البلمرة)، ولكن إدخال تفاعلات جديدة كذلك والتي تطور إلى حد كبير إنتاجية وطبيعة المنتجات.
٣. إنتاج الجازولين أعلى. حوالي ٧٠% من المادة الخام تتحول إلى الجازولين.

٤. الجازولين المنتج بواسطة التكسير باستخدام الحافز الوسيط يحتوي على نسبة قليلة من الأولوفينات (olefins) ونسبة عالية من (isoparraffins) و الهيدروكربونات الأروماتية. هذه تزيد خاصية عدم الخبط للجازولين. الجازولين الذي يتكون بالتكسير باستخدام العامل الوسيط له رقم أوكتين ٨٠

٥. غير مطلوب أي وقود خارجي بالتكسير، ذلك لأن الحرارة المطلوبة يتم الحصول عليها بحرق الكوك المرسب على العامل الوسيط نفسه، أثناء عملية التنشيط.

٦. يمكن تحكم أفضل في العملية أفضل من العملية الحرارية، وبذا يمكن الحصول على المنتجات المطلوبة.

٧. المنتج يحتوي كمية صغيرة جدا من الكبريت الغير مرغوب فيه لأن معظمه يهرب في شكل غاز H2S أثناء التكسير.

٨. الجازولين المنتج يحتوي على أقل القليل من الصمغ ومن المركبات المكونة للصمغ.

٩. مقارنة بالتكسير الحراري، فإن التكسير بالعامل الوسيط ينتج كوك أقل وغاز أقل وزيادة في المنتجات السائلة.

١٠. العوامل الوسيطة هي ذات طبيعة اختيارية (selective) في عملها ولذلك يحدث التكسير فقط للأجزاء ذات درجة حرارة الغليان المرتفعة.

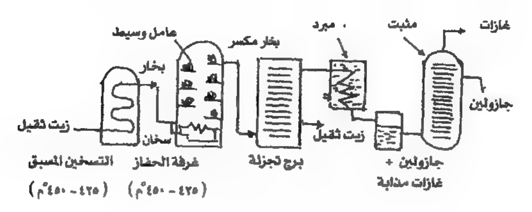
١١. تصاعد الغاز المصاحب يمكن خفضه، بما يزيد من إنتاجية الجازولين.

١٢. المواد المكونة للكوك يتم امتصاصها بواسطة العوامل الوسيطة بمجرد تكوينها.

طبقا لطريقة استخدام العامل الوسيط، فإن التكسير بالعامل الوسيط يكون من نوعين وهما:

التكسير بطبقة العامل الوسيط الثابتة: (fixed bed)

في هذا النوع من التكسير يكون العامل الوسيط في شكل حبيبات أو كرات. هذه الحبيبات أو الكرات تستخدم في شكل طبقات ثابتة في أبراج العامل الوسيط. شكل (١/١٦)



شكل (١/١٦) التكسير بالعامل الوسيط بالطبقة المثبتة

شحنة الزيت الثقيل يتم تمريرها خلال سخان وتسخينها إلى درجة حرارة التكسير (٤٢٠ °م – ٤٥٠ °م). عندئذ يتم مرور الشحنة خلال غرفة العامل الوسيط. العامل الوسيط المستخدم يكون إما هلام السيليكا الألومينا (Gel $SiO_2.Al_2O_3$) أء البوكسيت المخلوط بالطفل وأكسيد الزركونيوم. برج العامل الوسيط يظل كذلك عند ٤٢٠ – ٤٥٠ °م وعند ضغط من ١ – ٥ كجرام/ سم^٢. تكسير أبخرة الزيت الثقيل يحدث في غرفة العامل الوسيط وحوالي ٣٠ – ٤٠% من الشحنة يتحول إلى هيدروكربونات ذات الوزن الجزيئي المنخفض. الكربون المتكون أثناء عملية التكسير (حوالي ٤%) يمتص على العامل الوسيط بما يسبب عدم تنشيطه. يتم تمرير الأبخرة التي تم تكسيرها خلال برج التجزئة، حيث يتم استعادة أبخرة الجازولين من أعلى والزيوت الثقيلة يحدث لها تكثيف عند القاع. يتم تعريض أبخرة الجازولين إلى مبرد حيث يحدث تكثف للجازولين مع بعض المنتجات الغازية الأخرى. بعد ذلك يرسل الجازولين إلى المثبت (stabilizer)، حيث الغازات المذابة يتم إزالتها من القمة ويتم الحصول على الجازولين

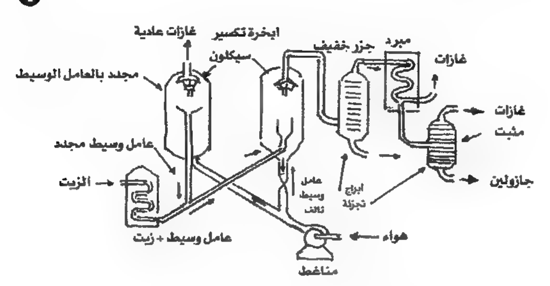
النقي الذي له مجال الغليان المطلوب شكل (١/١٦).

أثناء العملية، يتوقف العامل الوسيط عن العمل بعد حوالي ١٠ – ١١ ساعة، بسبب ترسيب حبيبات الكربون المتكونة أثناء عملية التكسير. وهذا يعاد تنشيطه بحرق الكربون في تيار من الهواء الساخن. أثناء إعادة تنشيط العامل الوسيط فإن أبخرة الزيت الثقيل يتم تحويلها خلال برج آخر بغرفة عامل وسيط أو أن التفاعل يتقدم باستمرار.

نظرا لأن تفاعلات التكسير هي تفاعلات ماصة للحرارة (Endothermic)، فإن درجة الحرارة في غرفة العامل الوسيط يتم المحافظة عليها بتدوير ملح مصهور (خليط من نترات الصوديوم ونيتريت الصوديوم) في مواسير تمر خلال طبقة العامل الوسيط.

التكسير الحراري بطبقة العامل الوسيط المتحركة:

هذا معروف كذلك بالتكسير بعامل وسيط بطبقة العامل الوسيط المائعة (fluid bed). في هذا النوع من التكسير، يكون العامل الوسيط في شكل مسحوق دقيق الذي يتدفق إلى أسفل إلى غرفة التكسير، خلال قادوس. يتم خلط العامل الوسيط بأبخرة الزيت الثقيل ويسلك مثل طبقة المائع الذي يمكن تدويره في تدفق مسارات الغاز. محطة الطبقة المائعة أو طبقة العامل الوسيط المتحركة للتكسير تتكون من مفاعل ومنشط مجهزين جنبا إلى جنب شكل (١/١٧).



، شكل (١/١٧) التكسير بعامل وسيط بالطبقة المتحركة

الزيت الثقيل يتم تسخينه في سخان والأبخرة يتم خلطها مع العامل الوسيط الساخن، في شكل مسحوق دقيق، والذي يتم إدخاله من المنشط. يدفع الخليط إلى مفاعل ضخم الذي يظل عند درجة حرارة ٥٠٠ °م . بسبب درجة الحرارة المرتفعة للعامل الوسيط (٦٠٠ °م) يبدأ تكسير الزيت الثقيل حتى قبل دخوله إلى المفاعل. هذا يسهل التكسير للأجزاء ذات درجة حرارة الغليان المرتفعة كذلك. بعد التكسير للزيت الثقيل في المفاعل، فإن الأبخرة التي تم تكسيرها يتم مرورها إلى برج التجزئة خلال السيكلون الداخلي. السيكلون الداخلي يتم تثبيته عند قمة المفاعل الذي يسمح فقط لأبخرة الزيت التي تم تكسيرها إلى المرور إلى برج التجزئة، مع احتجاز مسحوق العامل الوسيط في المفاعل نفسه خلال الأداء السيكلوني (الطرد المركزي). مسحوق العامل الوسيط يصبح أثقل تدريجيا بسبب ترسيب الكربون عند القاع. العامل الوسيط المستهلك يتم دفعه بتيار من الهواء إلى المنشط الذي عند درجة حرارة ٦٠٠ °م. في المنشط يتم حرق الكربون ويتم إعادة تنشيط العامل الوسيط. العامل الوسيط الذي تم استعادة نشاطه عندئذ يتدفق إلى أسفل خلال أنبوب حامل للخلط مع الشحنة الجديدة. السيكلون المثبت عند قمة المنشط (regenerator) يسمح فقط بالغازات مثل CO_2....الخ

بالمرور، مع احتجاز حبيبات العامل الوسيط. الحرارة المنطلقة أثناء عملية التنشيط تستخدم في التسخين المسبق للعامل الوسيط.

الجازولين المخلق (synthetic petrol)

كميات كبيرة من الجازولين يتم توفيرها من عمليات التكسير والتقطير. ولكن لزيادة الطلب على الجازولين كان من الضروري تخليقه من مصادر أخرى. الطرق الرئيسية لتخليق الجازولين هي:

البلمرات: (polymerization)

يقصد بالبلمرة إنتاج الجازولين المتميز، البلمرة هي عملية متممة لعملية التكسير بالعامل الوسيط. أثناء التكسير يتم الحصول على منتجات ثانوية من الأولوفينز والهيدروكربونات الغير مشبعة، مثل الإيثين (Ethene)، البروبين، البيوتين. عند تعرض هذه الغازات إلى ضغط عالي ودرجة حرارة مرتفعة في وجود عامل وسيط، فإنه يحدث لها البلمرة لتكون هيدروكربونات أعلى، تشبه الجازولين.

$$CH_3-CH=CH_2+CH_3-CH_2-CH=CH_2 \rightarrow$$

Propene 1- Butene

$$CH_2=CH-CH_2-CH(CH_3)_2$$

5-Methylhexene

الجازولين المنتج يسمى الجازولين البوليمر. وله رقم أكتين جيد (٧٨ إلى ٨٣).

بالمثل عند مرور غازات التكسير (cracked gases) في حامض كبريتيك بتركيز ٧٠% عند ١٠ – ٢٠ °م فإنه تحدث بلمرة لجزيئين من الإيزوبيوتين، تاركا الأوليفينات الأخرى والتي لم تتأثر. يتم هدرجة (di-isobutelene) فوق النيكل كعامل وسيط عند ضغط ودرجة حرارة ١٦٠ °م لإنتاج أيزوأوكتين (iso octane). الأيزوأوكتين في الشكل النقي له رقم أوكتين ١٠٠.

$$2CH_3-\underset{\underset{CH_3}{|}}{C}=CH_2 \rightarrow CH_2-\underset{\underset{CH_3}{|}}{\overset{\overset{CH_3}{|}}{C}}-\underset{\underset{CH_3}{|}}{C}=CH_2 \xrightarrow{H_2}$$

(with CH_3 below the first carbon on the left: $\underset{CH_3}{|}CH_3$)

أيزوبيوتين   داي أيزوبيوتيلين

$$\xrightarrow{H_2} CH_3-\underset{\underset{CH_3}{|}}{\overset{\overset{CH_3}{|}}{C}}-CH_2-\underset{\underset{CH_3}{|}}{CH}-CH_3$$

Iso-Octane

البلمرة يمكن أن تتم بطريقتين وهما:

البلمرة الحرارية: (thermal poymerization)

وهذه تتم بتعريض غازات التكسير إلى درجة حرارة ٥٠٠ – ٦٠٠ °م وضغط ٧٠ – ٣٥٠ كجرام/ سم^2. المنتجات التي تتكون هي الجازولين وزيت الغاز (السولار وزيت الديزل) حيث يتم فصلهم بالتقطير الجزئي.

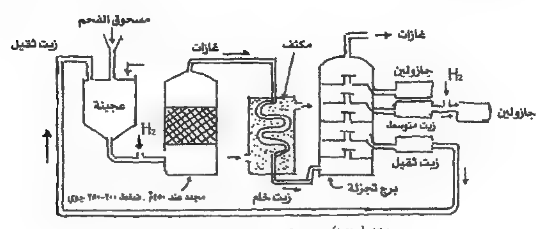
البلمرة بالعامل الوسيط: (catalytic polymerization)

تتم البلمرة في وجود عامل وسيط وهو حامض الفوسفوريك، حامض الكبريتيك ....الخ. معدل تفاعل البلمرة يزداد في وجود العامل الوسيط وتتم العملية عند درجة حرارة منخفضة (١٥٠ – ٢٠٠ °م). بعض من الرباط بين الجزئيات الذي لا يتم بالبلمرة الحرارية يمكن أن يتم بالبلمرة بين الجزيئات باستخدام العامل الوسيط.

طريقة بير جيس (bergivs process) شكل (١/١٨)

إنتاج الجازولين بالهدرجة الإتلافية للفحم تم تنميتها في ألمانيا بواسطة إنتاج الجازولين بالهدرجة الإتلافية للفحم تم تنميتها في ألمانيا بواسطة بيرجيس. العملية تتضمن تحويل الفحم من النوع المتدني مثل الفحم البني أو البيتوميني إلى سائل ووقود غازي بهدرجتهم في وجود عامل وسيط.

يتم خليط مسحوق الفحم من النوع المتدني مع زيت عالي الكثافة (Heavy oil) وعامل وسيط. العامل الوسيط المستخدم هو مركب من الحديد والقصدير، والمولبدنيوم. العجينة التي يتم الحصول عليها بالخلط يتم تسخينها بالهدروجين عند ٤٥٠ – ٤٩٠ °م عند ضغط ٢٠٠ جوي لمدة ساعتين. يتحد الهيدروجين مع الفحم ليكون هيدروكربونات مشبعة، والتي تنتج سائل من الهيدروكربون ذو درجة حرارة غليان منخفضة تحت ظروف درجة الحرارة العالية والضغط العالي (تكسير). الأبخرة التي تترك المحلول بالعامل الوسيط (catalytic convertor) يتم تمريرها خلال مبرد حيث يتم الحصول على سائل يشبه البترول الخام. يتم تعريض هذا البترول الخام المنتج إلى التقطير الجزئي لإنتاج (١)الجازولين، (٢) زيت متوسط (middle oil) (٣) زيت ثقيل. يتم هدرجة الثقيل المتوسط ثانيا في وجود عامل وسيط لإنتاج جازولين أكثر. يستخدم الزيت الثقيل ثانيا لعمل عجينة مع رماد ا لفحم الطازج. جزء الجازولين يحتوي ٧٤% بارافينات، ٢٢% مواد أروماتية، ٤% أوليفينز. طن واحد من الفحم وجد أنه ينتج ١٤٠ جالون من الجازولين. هدرجة الفحم ليست اقتصادية وتستخدمها الدول التي ليس لها موارد بترولية ولكنها غنية في موارد الفحم.



شكل (١/١٨) طريقة برجيس لهدرجه الفحم الي جازولين

طريقة فيشر ترويش: (Fischer Tropsch Process) شكل (١/١٩)

تم تنميه هذه الطريقة بواسطة كلا من فيشر وترويش في ألمانيا عام ١٩٦٢ . فقد أثبتا أن خليط من غاز الماء النقي (وهو مزيج من الهيدروجين وأول أكسيد الكربون النقي) والهيدروجين عند الضغط العادي ودرجة الحرارة من ٢٠٠ °م إلى ٣٠٠ °م في وجود عامل وسيط من الكوبالت أو الحديد، أنتج خليط من كل من (Alkanes, Alkenes). من هذا الخليط يمكن فصل جزء يشبه الجازولين بالتقطير الجزئي. طبيعة المنتج يتم تحديدها بدرجة الحرارة، الضغط وطبيعة العامل الوسيط.

$$nCO + (2n + 1) H_2 \rightarrow C_nH_{2n+2} + nH_2O$$

$$nCO + 2nH_2 \rightarrow C_nH_{2n+2} + nH_2O$$

غاز الماء اللازم للتفاعل السابق يتم الحصول عليه من الفحم. يتم أولا تحويل الفحم إلى الكوك. يتم الحصول على غاز الماء بتفاعل البخار فوق الكوك الساخن الأحمر.

$$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$$

غاز الماء كوك ساخن

غاز الماء المخلوط بالهيدروجين يتم تمريره فوق Fe_2O_3 لإزالة الكبريت ومركباته. يتم بعد ذلك تنقية الخليط بالمرور فوق Fe_2O_3 المخلوط مع Na_2CO_3 لإزالة مركبات الكبريت العضوية. الغاز النقي يتم عندئذ إدخاله في محول العامل المساعد (catalytic converter) بعد ضغطه إلى ٥ – ٢٥ جوي. يتكون العامل الوسيط من الكوبالت (١٠٠ جزء)، الثوريا وهي أكسيد الثوريوم (٥ أجزاء) والماجنيزيا وهي أكسيد المغنسيوم (٨ أجزاء) والكيزيلجر (kieselguhr) وهي تراب قاعي دياتومي (٢٠٠ جزء) ويستمر عند درجة حرارة ٢٠٠ – ٢٥٠ °م. نواتج التفاعل السائدة هي البارافينات والأوليفينات ذات التسلسل المستقيم (straight chain) .

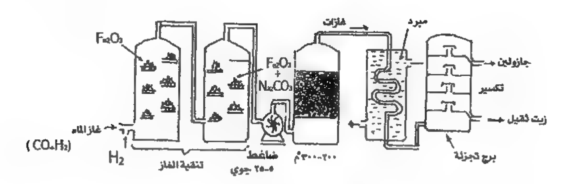
التفاعلات التي تؤدي إلى تكون الهيدروكربونات كلها تفاعلات منتجة للحرارة (exothermic). الأبخرة الخارجة من غرفة التفاعل يتم مرورها خلال مبرد حيث يتم الحصول على سائل يشبه الزيت الخام. يتم تقطير وتجزئة الزيت الخام لإنتاج الجازولين المخلق، زيت الديزل والزيت الثقيل. في طريقة فيشر وتروبش الجازولين الذي يتكون يكون غنيا بالهيدروكربونات ذات التسلسل المستقيم وكذلك فإن رقم الأكتين للجازولين يكون فقط ٤٠ ولكن زيت الديزل المنتج يكون من نوعية ممتازة.

مما سبق يتضح أن التفاعل بين H_2،CO في وجود عامل وسيط هو أساس طريقة فيشر وتروبش. ولكن نجاحها التجاري يتوقف إلى حد كبير على طريقة تحضير غاز الماء وتنقيته من الملوثات مثل الكبريت....الخ الذي يسبب التسمم للعامل الوسيط. حوالي ٨٠% من تكاليف التشغيل للعملية تستنفذ في تصنيع وتنقية الغاز المخلق.



عامل وسط

كيزلجور + M_3O+ th+ Co



شكل (١/١٩) طريقة تروبش

الآلية: (mechanism)

يعتقد أن التفاعل يشمل تكون كربيد المعدن (cobalt carbide). كربيد المعدن هذا عند الهدرجة التالية يتنقسم ليكون شق الميثيلين والكوبالت. شق الميثيلين يتبلمر في وجود الهيدروجين ليكون (alkanes, alkenes) التسلسل المستقيم.

آلية التفاعلات يمكن تمثيلها كالآتي:

حيث x تمثل المعدن من العامل الوسيط.

$CO + 2X \rightarrow XC + XO$

(كربيد المعدن) (أكسيد المعدن)

$XC + XO + 2H_2 \rightarrow 2X + (CH_2) + H_2O$

ميثيلين

$(CH_2) + H_2 \rightarrow CH_4$

$C_nH_{2n} + H_2 \rightarrow C_nH_{2n+2}$

وجهات النظر الأخرى ترى أن العامل الوسيط يعمل أساسا خلال تكوين مركب معقد من المعدن من الأكسجين.كربيد المعدن يساهم فقط ١٠ – ١٥% من الهيدروكربونات المنتجة.

تنقية الجازولين (refining of gasoline)

الجازولين المنتج من الزيت الخام أو بالعمليات التخليقية يحتوي على الأوليفينز (olefins) الغير مشبع والكبريت. وجود تلك المواد غير مرغوب فيه لأن:

- الأوليفينز يمكن أن تتأكسد وتتبلمر بما يؤدي إلى تكون صموغ ورواسب عند التخزين. هذه ترسب على جدار المكربن (carburetor – الكرابيراتير) وتوقف المحرك.
- مركبات الكبريت يمكن أن تؤدي إلى التآكل لمحركات الاحتراق الداخلي. مركبات الكبريت مثل الكحول الكبريتي (mercaptans) أو كبريتيد الهيدروجين لها رائحة منفرد كما يقال أنها تسبب تعفن للزيت (oil sour). لذلك، فإنه يلزم تنقية الجازولين قبل وصوله إلى المستهلك. إزالة تلك المركبات الغير مرغوب فيها يمكن تحقيقه بالطرق الكيميائية والطبيعية.

إزالة مركبات الكبريت:

الجازولين المحتوي على الكبريت يسمى الجازولين العفن (sourpetrol) . مركبات الكبريت يتم إزالتها بمعالجة الجازولين بواسطة مركب من الرصاص يسمى صوديوم بلمبيت مع إضافة محكمة من الكبريت.

$$Na_2PbO_2 + 2RSH \rightarrow Pb(SR)_2 + 2NaOH$$

Lead mercaptide

$$Pb(SR)_2 + S \rightarrow Pb(S) + RSSR$$

(Disulphide)

عملية تحويل الكبريت إلى (Disulphides) تسمى التحلية "Sweetening" ويعني بها إزالة الكبريت. حيث (PbS) الذي يتكون يتم إزالته بالترشيح. الداي سلفيد في الجازولين يتم استخلاصه بمذيب مناسب.

إزالة الأوليفينز: (Olefins)

الهيدروكربونات الغير مشبعة أو الأوليفينز يمكن إزالتها بمعالجة الجازولين بواسطة حامض الكبريتيك البارد بتركيز ٨٠%. وهذا لا يتفاعل مع البارافينات أو النفثينات أو الأروماتيك، ولكن يتفاعل مع المركبات الغير مشبعة مكونا كحولات وإيسترات (Esters) ويعمل على بلمرة تلك إلى مواد شبيهة بالقار والتي يمكن إزالتها بالترشيح.

كذلك يمكن تنقية الجازولين بمروره خلال تراب القصار (Fuller's Earth) والذي يمكنه امتصاص الألوان وكذلك الأوليفينات.

الجازولين المنقي، عند التخزين يمكن أن تحدث له أكسدة بطيئة مسببة تكون الصمغ. يمكن إيقاف ذلك باستخدام المثبطات التي تعيق عمليات الأكسدة مثل الأمينوفينول والأروماتيك أمينز (Aminophenols and Aromatic Amines)

جدول ( ) مقارنة بين جازولين التكرير، التكسير، البلمرة

جازولين التقطير للخام	جازولين التكسير	جازولين البلمرة
ينتج من تقطير الزيت الخام يتم فصله طبيعيا من الخام	ينتج من الزيت الثقيل المكونات ذات الوزن الجزيئي العالي	ينتج من المكونات ذات الوزن الجزيئي المنخفض
له رقم أوكتين منخفض	له رقم أكتين عالي	له أعلى رقم أكتين
يحتوي فقط على الألكينز العادي	يحتوي على كثير من الأرماتيك والنفثينز، الهيدروكربونات المتشعبة	يحتوي على الكثير من الهيدروكربونات ذات التسلسل المتشعب
مجال التكوين متسع من C_9–C_5	مجال التكوين ضيق من C_8–C_6	مجال التكوين ضيق جداً من C_9–C_7

الخبط: (knocking)

الوقود المستخدم في محركات الاحتراق الداخلي هو الجازولين أو الديزل. في محركات الاحتراق الداخلي، خليط من الوقود (الجازولين أو الديزل) يتم حرقه في الاسطوانة (السيليندر). يتم الحرق بواسطة شرارة كهربية (في محركات البنزين) أو بضغط الهواء (في محركات الديزل).

الغاز الناتج أثناء الحرق، يدفع المكبس (البستم) إلى أسفل بسبب الضغط العالي، وبذا يوفر مشوار القوة (power stroke). العملية كلها تشمل أربعة أشواط في محرك **البنزين (الجازولين):**

١. أبخرة الوقود مع الهواء في المكربن يتم سحبها إلى السلندر أثناء جزء الحث (Induction part) وهذه الخطوة تسمى شوط السحب (suction stroke).

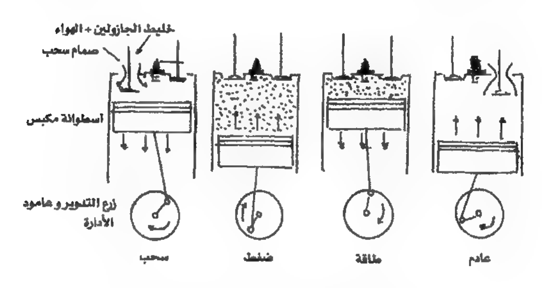
٢. خليط الوقود الهواء يتم ضغطه مكونا شوط الضغط.

٣. يتم حرق الخليط بواسطة شرارة كهربية. الغازات الساخنة المنتجة بسبب الحرق تزيد ا لضغط وتدفع المكبس (البستم) إلى أسفل. هذا ما يعرف بشوط القدرة (power stroke).

٤. في الشوط الأخير، والذي يسمى شوط العادم (exhaust stroke) يهبط المكبس ويطرد الغازات العادمة من السيلندر. تبدأ الدورة التالية ثانيا. خليط الوقود يجب أن يحترق بسرعة وبنعومة، أي بعد تنشيط التفاعل بالشرر الكهربي، فإن اللهب يجب أن ينتشر سريعا ومتجانسا خلال خليط الغاز هذا بحيث أن الغاز المتمدد يدفع المكبس إلى أسفل الاسطوانة بنعومة الشكل (١/٢٠) يمثل مخطط للأشواط الأربع لمحرك الاحتراق بالشرارة الكهربية.

نسبة حجم الغاز في الاسطوانة عند نهاية شوط المسحب إلى الحجم عند نهاية شوط الضغط للمكبس يسمى نسبة الضغط. (compression-ratio). كفاءة المحرك

تتوقف على هذه النسبة. نسبة الضغط المرتفعة تعني زيادة كفاءة المحرك. ولكن، في حالة زيادة نسبة الضغط عن حد معين، فإن خليط الوقود الهواء يمكن أن تحدث له سخونة إلى درجة حرارة أكبر من درجة حرارة اشتعاله ويحدث حرق فوري حتى قبل الشرر. هذا ما يسمى الحرق المسبق (pre-ignition). كذلك قد يحدث أن الجزء الأخير الذي لم يتم حرقه من خليط الوقود – الهواء بعد الشرر الكهربي يحدث له حرق ذاتي فوري، بما ينتج عنه انفجار عنيف. هذا الانفجار ينتج موجة صدمية، والتي تتشتت طاقتها بخبط حوائط الاسطوانة والمكبس، منتجة صوت معدني مميز والذي يسمى الخبط (knocking).



شكل (١/٢٠) مخطط المراحل الأربع ..(السحب و الضغط و الطاقة و العادم)
لمحرك الأحتراق الداخلي و المعروف بالمحرك ذو الأربع دورات

لذلك فإن الخبط عبارة عن صوت معدني حاد يشبه القرع بالمطرقة الناتج في محركات الاحتراق الداخلي بسبب الحرق الغير ناضج لخليط الهواء – الغاز.

الخبط لا يقلل فقط كفاءة المحرك ولكن يسبب فقد كبير في الطاقة وإتلاف للأسطوانة والمكبس. ظاهرة الخبط ليست مفهومة تماما ولكن يعتقد أنها مرتبطة بالمكونات

الكيميائية للوقود سبب الخبط هو من خواص الوقود وتصميم المحرك.

التركيب الكيماوي والخبط:

التركيب الكيماوي للوقود المستخدم له علاقة قريبة بخواص الخبط:

- الاستعداد للخبط يقل مع زيادة الدمج للجزيئات ذات الرباط المزدوج والتركيب الحلقي. (compactness of the molecules double bonds, cyclic structures) لذلك فإن الأليفنيات (olefins) بذات طول سلسلة – الكربون تمتلك خواص أفضل لعدم الخبط (antiknock) عن البارافينات المقابلة.
- في حالة البارافينات العادية، يزداد الخبط مع الزيادة في طول سلسلة الهيدروكربون. لذلك فإن الاستعداد للخبط في السلسلة المستقيمة للبارافينات (paraffins) تتبع النظام التالي.

n-heptane> n-hexane> n-pentane> n-butane

- بارافينات التسلسل المتشعب (branched chain) وموقعها. لذلك فإن استعداد الخبط لمختلف المركبات الأيزوميرية (أي ذات التركيب الكيماوي الواحد ولكن تختلف في الخواص) لمركب الهبتين (Heptane) تتبع النظام التالي.

n-heptane> 2-methyl hexane> 2.2 dimethyl pentane

- المواد الأروماتية مثل البنزين (C_6H_6) والتولوين ($C_6H_5CH_3$) لها خواص عدم خبط عالية جدا. عموما فإن استعداد الوقود للخبط يكون طبقا للآتي:

البارافينات ذت التسلسل المستقيم > البارافينات ذات التسلسل المتشعب > الأوليفينز > البارافينات الحلقية (cyclo parraffins) > (naphthenes) > المواد الأروماتية (atomatics).

درجة الأوكتين أو رقم الأوكتين: (octane rating)

خاصية عدم الخبط للجازولين (مقاومة الخبط) لا يمكن تعريفها بمصطلحات

مطلقة. لتقيم الوقود طبقا لخاصية الخبط، فقد تم إعداد مقياس اختياري في عام ١٩٢٦ بواسطة (edger) الذي يعرف برقم الأوكتين. فقد لوحظ أن (n-heptane) يخبط بطريقة سيئة جدا ولذلك تم تعيينه كقيمة عدم الخبط تساوي صفر. وعلى الجانب الآخر فإن الأيزو أوكتين (iso octane) (2.2 trimethyl pentane) له مقاومة عالية للخبط ولذلك تم تعيينه اختياريا بقيمة ١٠٠.

$$H_3C - CH_2 - CH_2 - CH_2 - CH_2 - CH_2CH_3$$

n-heptane

قيمة عدم الخبط = صفر

$$\begin{array}{ccccccccc} & & CH_3 & & & & CH_3 & & \\ & & / & & & & / & & \\ CH_3 & - & C & - & CH_2 & - & CH & - & CH_3 \\ & & / & & & & & & \\ & & CH_3 & & & & & & \end{array}$$

أيزو أوكتين

2.4 Trimethyl pentane

antiknock value = 100

رقم الأوكتين للوقود يعرف بأنه نسب الأيزوأوكتين الموجودة في خليط من الأيزوأوكتين، n – هبتين (n-heptane) والذي له نفس خواص الخبط مثل ذلك للوقود تحت الاختبار، تحت نفس مجموعة الظروف. لذلك فإن الجازولين الذي له رقم أوكتين ٨٠، سوف يعطي نفس الخبط لخليط من الأيزو أوكتين ، n هبتين المحتوي على٨٠% الأيزو أوكتين بالحجم. زيادة رقم الأوكتين يزيد من خاصية عدم الخبط للوقود.

رقم الأوكتين لجازولين التكسير أعلى من جازولين التقطير من الخام (straight run)، يسبب إلى النسبة الأعلى كثيرا من الهيدروكربونات الغير مشبعة والحلقية في جازولين التكسير. رقم الأوكتين لبعض الهيدروكربونات العادية موضح في الجدول الآتي:

الهيدروكربون	رقم الأوكتين	الهيدروكربون	رقم الأوكتين
بنزين (C_6H_6)	١٠٦	N-Pentane	٦٢
Isopentane	٩٠	N-Hexane	٢٦
Cyclohexane	٧٧	Alcoho	٩٥
2-Methyl Pentane	٧١		

لعمل محرك الجازولين بدون حدوث خبط فإنه يلزم توفير نوعية معينة ذات أدنى – خبط. في مصر جازولين المحركات يكون من نوعين وهما رقم أوكتين ٩٠، والمتميز حيث رقم الأوكتين ١٠٠.

العوامل المساعدة في عدم الخبط: (antiknock agents)

رقم الأوكتين للجازولين التجاري لا يعود كلية للهيدروكربونات فقط. إضافات معينة تضاف إلى الجازولين لتحسين خواص عدم الخبط. هذه الإضافات تعرف بعوامل عدم الخبط. يمكن استخدام البنزول والكحولات كعوامل عدم الخبط ذلك لأن لها قيم مرتفعة لعدم الخبط.

قد يضاف تترا إيثيل ليد [Tetraethyl Lead - Pb (C_2H_5)] إلى الجازولين لزيادة الرقم الأوكتيني. (TEL) عبارة عن سائل ليس له لون وهو شديد السمية. حوالي ٠,٥ سم^3 من (TEL) يضاف على اللتر لزيت المحركات وحوالي ١ سم^3 يضاف على اللتر لوقود الطائرات. لمعرفة أن الوقود تم معالجته بالرصاص (leaded) يتم إضافة صبغة حمراء كذلك بنسبة ٢%. يعتقد أن الخبط هو آلية الشق الحر (Free Radical) الذي يؤدي إلى التفاعل المتسلسل والذي ينتج عنه فرقعة. أثناء الحرق يكون TEL رصاص وأكسيد رصاص (Pb, PbO). وهذه تعمل كمثبطات لسلسلة الشق الحر وبالتالي انتشار التفاعل المتسلسل المؤدي إلى الخبط يتم بتثبيط وتوقف حدوثه.

ولكن أبخرة الرصاص وأكسيد الرصاص المتكونة يمكن أن تلوث الجو. بمجرد حدوث فرقعة الحرق، فإن أكسيد الرصاص يختزل فورا إلى معدن الرصاص والذي يرسب على نقط شمعة الإشعال، وعلى جدار السيليندر ورأس المكبس (البستم). ولمنع حدوث هذه المشاكل يضاف كذلك إيثيلين داي برومايد ($C_2H_4Br_2$) ذلك ليتحول الرصاص الذي يتكون إلى بروميد الرصاص

$$Pb + C_2H_4Br_2 \rightarrow PbBr_2 + CH_2 = CH_2$$

بروميد الرصاص الذي يتكون يكون متطايرا ويهرب مع الغازات العادمة. يسبب التلوث البيئي فإن استخدام الجازولين المعالج بالرصاص تم التخلص منه حاليا.

عوامل عدم الخبط هي (tertiary butyl acetate) وكذلك (diethyl telluride)، البنزول والكحول. كذلك فإن (tricresyl phosphate) الذي يكون قادرا على إحباط الحرق المسبق للوقود يمكن كذلك استخدامه. البنزين (C_6H_6) هو كذلك عامل ضد الخبط. ولكن البنزين مسرطن ولذلك فإنه في حالة استخدامه يكون بتركيزات منخفضة جدا.

جازولين الطائرات: (aviation gasoline)

الجازولين المستخدم كوقود للطائرات له رقم أوكتين ١٠٠ وأكثر. نوعية عدم الخبط للوقود تحت الاختبار أي رقم الأوكتين يتم الحصول عليه بالمقارنة بخليط من الأيزوأوكتين ونوعية معلومة من (TEL) (Tetra ethyl lead) كوقود عياري (قياسي). فمثلا، رقم الأوكتين للوقود سيكون ١٠٠ + ٢ إذا كانت خواص عدم الخبط لهذا الوقود مثل خليط من أيزوأوكتين و ٢ سم ^{٣} من (TEL).

وقود محركات الديزل: (diesel engine fuels)

وقود محركات الديزل هو وقود محركات الحرق بالضغط (compression ignition). في محرك الديزل، يتم حرق الوقود باستخدام الحرارة والضغط وليس بالشرر الكهربي. في محرك الديزل يتم أولا سحب الهواء إلى الاسطوانة (مشوار

السحب) وضغطه إلى ضغط حوالي ٢٠ – ٥٠ كجرام/ سم ٢ (مشوار الضغط). خلال نهاية شوط الضغط، يتم حقن زيت الديزل في شكل نقاط صغيرة إلى الهواء المضغوط شديد السخونة. الجسيمات الصغيرة للوقود تمتص الحرارة من الهواء المضغوط ويحترق. ضغط الغاز الناتج أثناء الحرق/ الحرق يدفع المكبس إلى أسفل (شوط القوة). تتم الدورة عند مشوار العادم بينما يحدث دفع للغازات الساخنة من الاسطوانة.

الخبط في محرك الديزل:

الخاصية الرئيسية لوقود الديزل هي أنه يشتعل بسهولة تحت درجة حرارة الضغط. الفترة بين بداية حقن الوقود والحرق يسمى تخلف أو التأخر للحث. يتضح أنه للأداء الجيد لمحرك الديزل، هذا التأخر الحثي يجب أن يكون مختصرا ما أمكن.

عندما يطول التأخر الحثي، فإن جزء كبير من الوقود الذي تم حقنه يتراكم في الاسطوانة حتى قبل الحرق وعن حدوث الحرق فإن الوقود المتراكم يحترق بعنف مع زيادة مفاجئة في درجة الحرارة والضغط. هذا الحرق الغير منتظم للوقود يعرف بأنه خبط الديزل (diesel knocking). كلما زاد التأخر الحثي كلما ارتفع خبط ا لديزل.

كيميائيا وقود محرك الديزل يتكون من الهيدروكربونات ذات التسلسل المستقيم مع أدنى كمية من التسلسل المتشعب ومن الهيدروكربونات الأروماتية. لذلك، مقارنة بالجازولين فإن وقود محرك الديزل يجب أن يكون له درجة حرارة حرق فوري لخفض التأخر الحثي.

رقم السيتين: (cetane rating)

الوقود المطلوب لمحرك الديزل في مقارنة لوقود محركات الجازولين، ولذا، فإنه يستخدم مقياس مستقل لتعيين درجة زيت الديزل حيث لا يمكن تعيين درجته برقم الأكتين. رقم سيتين هي مقياس لسهولة حرق الوقود تحت الضغط. سيتين الهيدروكربون (n-hexadecane) له تأخير حرق قصير جدا مقارنة لأي وقود ديزل

وتعين له قيمة اختيارية ١٠٠. (n-methylnaphthalene) له تأخير حرق أطول مقارنة لأي وقود ديزل آخر ولذلك تم تقدير قيمته لتكون صفر.

رقم السيتين لزيت الديزل يمكن تعريفه بأنه نسبة السيتين في خليط من للسيتين و

(∝ - methyl naphthalene) الذي سيكون له نفس خواص الحرق مثل الوقود تحت الحرق، في نفس الظروف المعينة. فمثلا، فإن وقود للديزل سيحدد له رقم سيتين ٤٥ إذا كان له نفس خواص الحرق لخليط من ٤٥% سيتين، ٥٥% (∝ - methyl naphthalene).

$CH_3 - (CH_2)_{14} - CH_3$
Cetane
n-Hexadecane
(cetane No.100)

CH_3

∝ - methyl naphthalene
(cetane No. zero)

رقم السيتين للوقود يتوقف على طبيعة ومكونات الهيدروكربون. الهيدروكربون بالتسلسل المستقيم يحترق سريعا إلى حد ما بينما الأروماتيك لا يحترق بسهولة. نظام نوعية الحريق بين مكونات وقود الديزل بالنسبة لتقليل رقم السيتين هو كالآتي:

n-alkenes > naphthenes > alkenes > branched alkanes > aromatics.

يتضح مما سبق أن حالات الخبط لوقود الديزل هي على العكس تماما لما هو مطلوب للخبط في محركات الجازولين. هذا لأن سبب الخبط مختلف في كلا الحالتين. في محركات الجازولين فإن الحرق المسبق بالضغط يؤدي إلى الخبط ولذلك فإن الوقود ذو درجة حرارة اشتعال مرتفعة يكون مطلوبا. على الجانب الآخر في

محركات الديزل فإن تأخير الحرق هو سبب الخبط ويكون المطلوب هو الوقود الذي له درجة حرارة حرق منخفضة. لذلك، وقود محركات الجازولين الجيد يكون وقود رديء في محركات الديزل والعكس صحيح. رقم السيتين لوقود الديزل يمكن زيادته بإضافة إضافات سيتين. الإضافات المستخدمة عادة هي الآتية بعد (ethyl nitrate, isoamyl nitrate, acetone... etc) .

جدول ( ) مقارنة بين وقود الجازولين ووقود الديزل

وقود الديزل	وقود الجازولين
١- هو الجزء الذي يتم الحصول عليه بين ٢٥٠ – ٣٢٠ °م وهو خليط من هيدروكربونات $C_{18}-H_{38}$, $C_{15}-H_{23}$	١- هو جزء الذي يتم الحصول عليه بين ٤٠ – ١٢٠ °م وهو خليط من الهيدروكربونات C_5-H_{12} ، C_9-H_{20}
سعره رخيص	سعره مرتفع
٣- استهلاك الوقود قليل بالنسبة لوحدة الطاقة المنتجة	٣- استهلاك الوقود عالي بالنسبة لوحدة الطاقة المنتجة
٤- مناسب لمحركات الضغط	٤- مناسب لمحركات الحرق بالشرارة الكهربية
٥- الخبط يكون بسبب تأخير الحرق	٥- الخبط يكون بسبب الحرق المسبق
٦- خواص الحرق يعبر عنها برقم السيتين	٦- خواص الحرق يعبر عنها برقم الأوكتين
٧- غازات العادم تحتوي على كمية قليلة من الملوثات	٧- غازات العادم تحتوي على نسبة ملوثات أعلى
٨- الحرق يحتاج إلى تجهيزة حرق الوقود الأكثر تكلفة	٨- الحرق يحتاج إلى مكربن بسيط
٩- تستخدم إضافات من مواد alkyl	٩- يستخدم المواد tetra ethyl lead

وقود الديزل	وقود الجازولين
nitrates and acetone...etc لخفض الخبط	(TEL) , tellurides وذلك لخفض الخبط

إصلاح الجازولين: (Reforming)

بهدف زيادة خاصية عدم الخبط للجازولين المنتج من برج التقطير (برج التجزئة) (straight run gasoline) فإنه يتم تعريضه لنوع خاص من المعالجة المعروف باسم الإصلاح. الإصلاح يحدث تعديل في بناء مكونات الجازولين. هذا التعديل هو أساسا نتيجة إعادة تنظيم الجزئيات بدون تأثير كبير على متوسط و زنها الجزئي. التفاعلات الرئيسية في الإصلاح (التحسين) هي الآتي:

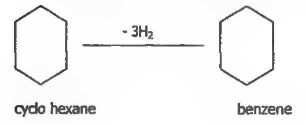
١. تكوين مركبات أروماتية بإزالة الهيدروجين من السيكلو ألكينز.

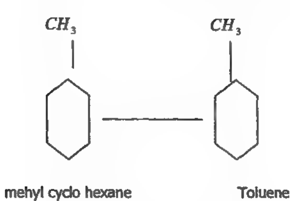
٢. إزالة الهيدروجين من البارافينات وتحويلها إلى حلقية.

٣. التكسير بالهيدروجين hydrocracking.

٤. الأزمرة isomerization

الحالة (١) تكوين مركبات أروماتية بإزالة الهيدروجين





الحالة (٢) dehydro cyclization of parraffins

$$\text{(}CH_3\text{, }CH_3\text{ ring)} \longrightarrow \text{(}CH_3\text{ ring)} \xrightarrow{-3H_2} \text{(}CH_3\text{ ring)}$$

الحالة (٣) التكسير الهيدروجيني (hydrocracking)

$$CH_3 - (CH_2)_8 - CH_3 + H_2 \xrightarrow{\text{بلاتين}} 2CH_3 - (CH_2)_3 - CH_3$$

n-pentane

الحالة (٤) الأزمرة Isomerization

$$CH_3 - CH_2 - CH_2 - CH_3 \rightarrow CH_3 - \underset{|}{\overset{CH_2}{CH}} - CH_3$$

Isobutene

التحسين أو الإصلاح للجازولين يمكن أن يتم إما حراريا أو في وجود عامل وسيط

التحسين الحراري: (thermal reforming)

التحسين الحراري يشمل تسخين الجازولين المنتج من برج الكسير إلى ٥٠٠ – ٦٠٠ °م وعند ضغط ٨٥ كجرام/ مم². يتم التحكم في درجة التحسين بالتبريد السريع للمنتجات برش الزيت البارد. المنتجات المحسنة يتم عندئذ تجزئتها لإزالة

المتبقي من الغازات. أثناء التحسين الحـــراري فإن المركبـــات المتكـــونة من (alkanes, alkenes) بسبب التكسير يحدث لها إزالة للهيدروجين وتحويل حلقي (cyclizaton) لتكوين مركبات (naphthenes). مركبات n-alkanes قد يتحول كذلك إلى بناء متسلسل ومتشعب (branched chain) بما يحقق رقم أوكتين أعلى المنتجات.

التحسين بالعامل الوسيط: (catalytic reforming)

التحسين بالعامل الوسيط يتم باستخدام عامل وسيط من البلاتين المحمول على الألومنيوم. ويتم عند درجة حرارة حوالي ٤٦٠ – ٥٣٠ °م وعند ضغط ٣٥ – ٥١ كجرام/ سم^{2}. التحسين باستخدام العامل الوسيط ينتج منتجات لها خواص متميزة كوقود مقارنة بالتحسين الحراري.

الهيدروجين المنبعث في تفاعلات التحسين يستخدم لعملية هدرجة الألكينز (alkenes)، تحسين التكسير لمركبات الألكينات الضخمة (larger alkanes) أو لإزالة الكبريت في الشحنة في شكل H_2S.

الوقود الغير بترولي: (non-petroleum fuels)

١. **البنزول** (benzol)

البنزول هو أحد المنتجات الجانبية (by products) لكربنة الفحم. وينتج كذلك أثناء التقطير الجزئي للزيت الخفيف. البنزول هو أساسا خليط من البنزين ٧٠% (C_6H_6)، التولوين ١٨% ($C_6H_5CH_3$)، الإكزايلين (٦%) (xylenes) ومركبات هيدروكربونائية أخرى. رقمه الأوكتيني ٨٧ – ٩٠. البنزول لا يمكن استخدامه كوقود للمحرك بمفرده ذلك لارتفاع درجة حرارة غليانه الأولية، بالإضافة إلى أن نقطة تجمده هي ٥٥ °م وبالتالي لا يمكن استخدامه في المناخ البارد. وهو بذلك يستخدم كعامل مضاف فقط. إضافة ٥٠% لبنزول المحرك فإن رقم الأكتين للجازولين يرتفع من ٧٠

إلى ٨٠. القيمة الحرارية للبنزول هي حوالي ١٠٢٠٠ كيلو سعر حراري/ الكيلوجرام.

٢. **كحول الطاقة (power alcohol)**

الكحول الإيثيلي (ethyl alcohol) وقود سائل هام وعند استخدامه في محركات الاحتراق الداخلي فإنه يسمى (power alcohol). الكحول الإيثيلي لا يستخدم كوقود رئيسي ولكن يتم خلطه مع الجازولين لزيادة الرقم الأوكتيني. عموما يوجد الجازولين والكحول بنسبة ٤ : ١ . القيمة الحرارية للكحول الإيثيلي هي أقل من ٧٠٠٠ كيلو سعر حراري/ كجرام ولكن له صفات عدم خبط جيدة. رقمه الأوكتيني ٩٠. بسبب عدم وجود أجزاء ذا درجة حرارة غليان منخفضة في الكحول الإيثيلي فإنه يصعب البدء في المحرك البارد إذا استخدام للكحول الإيثيلي فقط. لذلك فإنه دائما يتم خلطه مع الجازولين. يجب التأكيد أن الكحول الإيثيلي يمكن خلطه جيدا مع الجازولين فقط في وجود البنزين، التترالين أو الإيثر.

صناعة كحول الطاقة:

أهمية الكحول الإيثيلي كوقود تقع في حقيقة أنه ينتج من الكربوهيدريتس والتي هي عمليات تحلل طبيعية معمرة وبذا فإنه يصنع بتكلفة مناسبة.

يمكن تصنيع الكحول الإيثيلي من الهيدروكربونات، الكربوهيدريتس، النشويات والعسل الأسود، سوائل مخلفات الكبريتيت (wastesulphite liquor) من صناعة الورق ولب الورق.

ويصنع الكحول الإيثيلي من العسل الأسود (molasses)، وهو سائل بني داكن يوجد بعد بلورة السكر من عصير قصب السكر المركز وهو يحتوي على ٥٠% من السكر الغير مبلور والجلوكوز والفركتوز. استعادة السكر هذا من المولاس (العسل الأسود) هي عملية مكلفة، لذلك فإنه يستخدم في صناعة الكحول. تكوين الكحول يتضمن الخطوات الآتية:

١. التخفيف:

التركيز العالي للسكر في العسل الأسود يكون غير مناسب لتفاعل التخمر وبالتالي فإنه يتم تخفيفه بالماء للحصول على محلول بتركيز ٨ – ١٠% من السكريات.

٢. إضافة حامض كبريتيك مخفف:

في عملية التخمير يتم المحافظة على الرقم الهيدروجيني للمحلول (pH) ما بين ٤ إلى ٥. يضاف حامض الكبريتيك لضبط الرقم الهيدروجيني بين ٤ – ٥ . هذا الرقم الهيدروجيني ينشط نمو كائنات الخميرة المطلوبة ولكنه يعيق نمو أي نوع آخر من البكتريا التي يمكن أن تلوث المحلول.

٣. إضافة أملاح الأمونيا (ammonium salts)

عند عدم احتواء العسل الأسود على الكمية الكافية من غذاء الخميرة، فإنه يتم إضافة بعض مواد الغذاء مثل كبريتات الأمونيوم، فوسفات الأمونيوم للتغلب على نقص عنصري الفوسفور والنيتروجين. وهذه تعمل كغذاء للتخمر.

٤. إضافة الخميرة (Yeast) التخمر:

وهذه هي الخطوة الرئيسية في تكوين الكحول من العسل الأسود. التخمر هو العملية التي يحدث فيها تحلل للمواد العضوية المعقدة إلى مركبات بسيطة بسبب نشاط كائنات حية صغيرة معينة.

إلى المحلول السابق يتم إضافة سلالة منتقاة من الخميرة. يتم المحافظة على الخليط عند درجة حرارة ٣٠ °م لمدة ٢ – ٣ يوم. أثناء هذه الفترة يحدث التخمر. الأنزيمات الموجودة في الخميرة (invertase and symase) تقوم بتحلل السكر إلى الكحول الإيثيلي مع تصاعد غاز CO_2.

$$C_{12}H_{22}O_{11} + H_2O \xrightarrow{\text{invertase}} C_6H_{12}O_6 + C_6H_{12}O_6$$

فركتوز جلوكوز

symase

$$C_6H_{12}O_6 \xrightarrow{\text{Zymase}} 2C_2H_5OH + 2CO_2$$

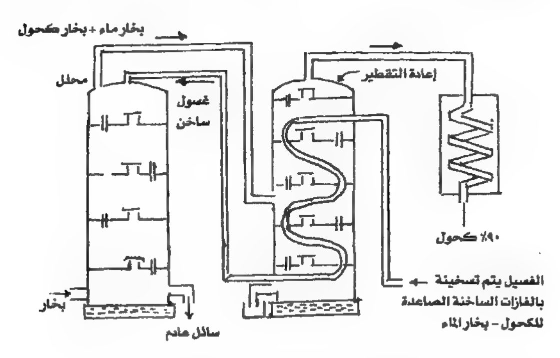
عند توقف تصاعد غاز CO_2 ، يتم ترشيح الخميرة. وترشيح المحلول المتخمر. هذا السائل بعد الترشيح يسمى (النقيع – wort)، والذي يحتوي على ٦ – ١٠% كحول إيثيلي، ٣ – ٥ % جلسرين، ألدهايدز، كحولات عالية....الخ. يتم تقطيره للحصول على الكحول الإيثيلي (ethy alcohol).

٥. **التقطير (distillation)**

يتم التقطير في وحدة تقطير خاصة تسمى (coffee still). وهي تتكون من محلل (analyzer)، ووحدة إعادة تقطير (rectifier). مزود بألواح مثقبة بمحابس تفتح إلى أعلى. يتم تحرك البخار والكحول في الاتجاه المعاكس شكل (١/٢١).

يدخل إدخال تيار من البخار من القاع للمحلل والنقع/ الغسول (ناتج الترشيح من الخطوة رقم (٤) يتم إدخاله من أعلى. يتم التسخين المسبق للغسول قبل دخوله إلى المحلل. عند حدوث التصاق بين البخار والغسول فإن الكحول في الغسول يتبخر ويحمل إلى المقطر الثاني (rectifier) مع البخار. في المقطر الثاني يحدث تكثف للبخار بينما يتبخر الكحول (درجة غليانه ٧٨,٣ °م) ويهرب من المقطر الثاني ويتم تكثيفه منفصلا. تركيز الكحول لا يمكن زيادته بالتقطير أكثر من ٩٧,٦% لأنه يكون خليط ذو درجة حرارة غليان ثابتة مع الماء. الخليط ذو درجة حرارة غليان ثابتة له درجة حرارة غليان أقل من الماء.

للاستخدام في محركات الاحتراق الداخلي يتم تحضير كحول ١٠٠% (كحول مطلق). ويتم هذا بعملية تسمى الخليط ذو درجة حرارة الغليان الثابتة. (azeotropic process).



شكل (١/٢١) تقطير الغسيل الردئ

التقطير بدرجة حرارة الغليان الثابتة: (azeotropic distillation)

في هذه العملية، الكحول الذي تم الحصول عليه من الخطوة السابقة يتم خلطه مع البنزين أو رابع كلوريد الكربون (ccl₄) ثم تقطير الخليط. البنزين أو رابع كلوريد الكربون طبقا لما يكون عليه الحال، يتقطر آخذا معه جزء من الكحول والماء تاركا خلفه الكحول المطلق (absolute alcohol).

الكحول المطلق يمكن تحضيره كذلك بهضم الكحول الذي تم إعادة تقطيره مع الجير المطفي لمدة يومين ثم التقطير. الأجزاء الأولى والأخيرة يتم التخلص منها ، والجزء الأوسط يكون هو الكحول المطلق.

مميزات الجازولين المخلوط بالكحول:

١. رقم الأوكتين للكحول مرتفع إلى حد ما (٩٠). لذلك عند خلطه مع الجازولين فإنه يزيد رقم الأكتين للجازولين. وهذا يحسن من خاصية عدم الخبط للجازولين.

٢. لا يوجد خفض في خرج الطاقة أو زيادة في الاستهلاك النوعي للوقود عند خلط الكحول مع الجازولين.
٣. يتم التغلب على صعوبات البداية (التحضير) بسبب درجة حرارة الغليان العالية للكحول، عند الإستخدام في شكل خليط مع الجازولين.
٤. خليط الكحول – الجازولين له استعداد لامتصاص آثار الرطوبة الموجودة.

عيوب الجازولين المخلوط بالكحول:

١. القيمة الحرارية للكحول منخفضة ولذا فإنه يقلل القيمة الحرارية للجازولين.
٢. الكحول سهل الأكسدة مكونا أحماض وبذا يسبب التآكل.
٣. نظرا لأن الهواء المطلوب لإكمال الحرق يكون أقل من الهواء اللازم للجازولين لذلك فإنه يتم تنظيم دخول الهواء إلى الاسطوانة بتطوير مدخل الهواء.
٤. نسبة تدفق الخليط تزاد إلى ١,٥٦ ضعف الجازولين فقط بتغيير حجم باثق المكربن (carbnurettor jet).

الفصل الرابع

4

الوقود الغاز
Gaseous Fuels

الخواص المميزة للوقود الغاز التي تجعله أفضل وقود هي، عدم وجود ملوثات معدنـــية، ثــبات النوعية، مناسبة الاستخدام، كفاءة عالية، قيمة حرارية عالية، وكثيرا آخر. تفضيل الوقود الغاز تم الحكم عليه بحقيقة بسيطة وهي أن الوقود الغاز يستخدم على نطاق كبير في الاستخدام المنزلي والصناعي.

بعض أنواع الوقود الغاز التجاري سيتم تناولها وهي الغاز الطبيعي، غاز الإنتاج، غاز الماء، غاز فرن الكوك.

١- الغاز الطبيعي: (Natural Gas)

الغـــاز الطبيعـــي هو وقود غاز هام مصاحب للرواسب البترولية. كما يوجد كذلك قريبا من مناجم الفحم وحقول البترول. الغاز الطبيعي المستخرج من آبار الزيت يمكن أن يكون إما جاف أو رطب. عندما لا يكون هناك زيت ولكن الغاز فقط في بئر البتـــرول فـــإن الغـــاز يـــسمى الغـــاز الجـــاف (dry gas). فـــي الغاز الجاف توجد الهيدروكـــربونات المنخفضة (lower) مثل الميثان والإيثان (methane, ethane). على الجانب الآخر عند وجود الغاز الطبيعي مع البترول في آبار البترول فإنه يسمى الغاز الـــرطب (wet gas). الغـــاز الرطب يتكون من الهيدروكربونات الأعلى (higher) مع

الميثان. القيمة الحرارية للغاز الرطب أعلى من تلك للغاز الجاف بسبب النسبة العالية للجزيئات الأثقل الغير مشبعة.

الغاز الطبيعي يتم تعريضه لمختلف المعالجات قبل استخدامه. مختلف المنتجات الجانبية من الغاز الطبيعي الخام هي ذات أهمية صناعية هامة ويتم استعادتها بوسائل مختلفة.

الغـــاز الرطب يستخرج منه الجازولين المتطاير (أو ذو درجة حرارة الغليان المنخفـضة) والذي يسمى جازولين رأس القيسون (casing head gasoline). الجازولين مـــن الغـــاز يمكن إزالته بالضغط، أو بغسيل الزيت (oil scrubbing) أو بالامتصاص بـــالفحم النباتـــي المنشط. منتجات أخرى ذات قيمة وهي (butane, propane, ethane, methane) والتـــي تستخدم كغاز البترول المسال (LPG). بالإضافة إلى المنتجات ذات القـــيمة الصناعية، فإن الغازات الطبيعية تحتوي على بعض المكونات الغير مرغوب فيها مثل الماء، الغبار، H_2S ،CO_2. الماء يتم إزالته بمعالجة الغاز مع مادة تجفيف مثل الألوميـــنا (alumina)، الـــسيليكا جـــيل، حامض الكبريتيك أو كلوريد الكالسيوم $cacl_2$ ....الخ. H_2S يتم إزالته بإذابته في الإيثانول أمين، يليه التسخين.

$$NH_2CH_2CH_2OH + H_2S \rightarrow (NH_2CH_2CH_2OH)H_2S$$
(monoethanolamine)

عند التسخين ينطلق H_2S. الغاز الذي يكون خاليا من كبريتيد الهيدروجين يسمى الغاز الحلو (sweet gas). كذلك يزال CO_2 بالتسخين مع NH_3.

$$2NH_3 + CO_2 + H_2O \rightarrow (NH_4)_2CO_3$$

المكونات (Composition)

المكونات الحقيقية للغاز الطبيعي تختلف كثيرا من حقل إلى آخر، المحتوى من الميثان (methane) يتراوح ما بين ٥٠% إلى ٩٠%.

متوســط مكونات الغاز هي: CH_4 = ٧٠ – ٩٠%، C_2H_6 = ٥–١٠ %، H_2 = ٣%، $CO + CO_2$ = الباقي.

القيمة الحرارية تتراوح ما بين ١٢٠٠٠ إلى ١٤٠٠٠ كيلو سعر حراري/ المتر المكعب.

الاستخدام:

- يستخدم في المجال المنزلي والصناعي ويحترق بلهب ساخن أزرق. يصل إلى المستهلك بواسطة شبكة من خطوط المواسير.
- يستخدم كمادة خام في تصنيع الميثانون، الفورمالدهايد، ومركبات كيميائية أخرى.
- يستخدم علـى نطاق واسع كمصدر للكربون والهيدروجين في الصناعات الكيميائية.
- يستخدم كذلك كمادة خام في صناعة اسود الكربون (carbon black).
- يمكن إنتاج البروتين الصناعي من الميثان بالصياغة المبكروبيولوجية (micro biological for mulation).

غاز البترول المسال (Liquified Petroleum Gas)

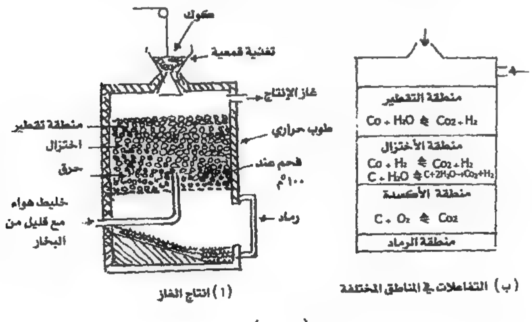
يتكون غاز البترول المسال من الهدروكربونات الخفيفة (حتى C_4) مثل البروبين (propane C_3H_6) والبيوتان (butane C_4H_{10}) الذي يمكن أن يسال سريعا تحت الضغط ولكن يمكن أن يوجد كغازات تحت الضغط الجوي. غاز البترول المسال يستخدم أساسا حاليا كوقود منزلي وإلى حد كبير كوقود صناعي كذلك. يتم عادة الإمداد به في اسطوانات تحت الضغط، بمختلف الأسماء التجارية. يمكن استخدام غاز البترول المسال كوقود للمحرك حيث يمكن خلطه بسهولة مع الهواء ويحترق نظيفا بدون أي متبقي كما أنه مقاوم للخبط. ولكن يلزم تداوله تحت ضغط ويفضل استخدامه فقط في المحركات التي تعمل تحت نسب ضغط عالية. البيوتين السائل يستخدم أساسا في الأغراض المنزلية، بينما يستخدم البروبين السائل أساسا في الأغراض الصناعية بسبب ضغطه الأعلى. غاز البترول المسال (LP6) أساسا (C_3H_6) له قيمة حرارية

حوالـــي ٢٥٠٠ كـــيلو ســـعر حراري/ م^{٣}. يستخدم غاز البترول المسال الآن كوقود للسيارات.

غاز الإنتاج (Producer Gas) شكل (١/٢٢)

خلـيط الغاز القابل للاحتراق الذي يتم الحصول عليه بتمرير الهواء والبخار فـوق الفحم أو الكوك المتوهج يعرف بغاز الإنتاج المصنع حيث يحدث التفاعل يسمى غـاز الإنـــتاج أو ببساطة (producer). المكونات الرئيسية لغاز الإنتاج هو أول أكسيد الكربون والنيتروجين. وهو وقود صناعي رخيص الذي يمكن الحصول عليه من الفحم ذو الرتبة المتدنية. فحم المستنقعات (peat)، مخلفات الأخشاب، لحاء وقشر الشجر وأي نوع آخر من الوقود الكربوني يمكن استخدامه.

الوقـــود الأكثـــر استخداما عموما هو الفحم والكوك. ولكن يعتبر أرخص وقود غازي ولكن يسبب وجود نسبة كبيرة من النيتروجين الذي لا يحترق فإن القيمة الحرارية هي الأدنى (١٣٠٠ كيلو سعر حراري/ المتر المكعب).



(أ) انتاج الغاز

(ب) التفاعلات في المناطق المختلفة

شكل (١/٢٢)

التصنيع:

ينتج غاز الإنتاج من فرن أسطواني ضخم (قطر داخلي ٦ – ١٢ قدم وارتفاع ١٠ – ١٥ قدم) المبطن بالطوب الحراري. ويجهز بمدخل للهواء عند القاع و مخرج للرماد. مزود عند القمة بقمع تغذية وفتحة جانبية لإزالة غاز الإنتاج المتكون. عند اختلاط خليط الهواء مع البخار ومروره فوق طبقة من الكوك أو الفحم الأحمر الساخن عند حوالي ١٠٠٠ °م إلى ١١٠٠ °م، فإن التفاعلات الآتية تحدث في أربع مناطق وهي:

١. **منطقة الرماد (Ash Zone)**

وهي المنخفضة الأكثر انخفاضا، بسمك حوالي ٨ سم، والتي تحتوي الرماد المتكون. الرماد يحمي المصبعه الشبكية الحديدية من شدة حرارة الحرق. بالإضافة، إلى أن الهواء والبخار المار خلال هذه المنطقة يتم تسخينه.

٢. **منطقة الأكسدة:**

عند التصاق الهواء مع الكوك أو الفحم الصلب، فإن كربون الفحم يحترق في وجود الهواء لتكوين CO_2 ,CO. درجة حرارة هذه المنطقة هي حوالي ١١٠٠ °م

$$C_{(s)} + \underbrace{O_{2(g)} + 3.76\,N_2}_{\text{هواء}} \rightarrow CO_{2(g)} + 3.76\,N_2$$

$$\Delta H = -97\ kcaL$$

$$C_{(s)} + \underbrace{1/2\,O_2 + 1.88\,N_2}_{\text{هواء}} \rightarrow CO_{(g)} + 1.88\,N_2$$

$$\Delta H = -29.5\ kcaL$$

منطقة الاختزال:

ثاني أكسيد الكربون المتكون في التفاعل السابق يحدث له اختزال إلى CO

بالتفاعل مع الكوك الأحمر الساخن.

$$2CO_2 \leftrightarrow 2CO \qquad \Delta H = +38.270\ kcaL$$

اختزال CO_2 هو تفاعل منتج للحرارة وهو التفاعل الوحيد الهام الذي يتحكم في العملية. ينشط تكون (CO) عند درجة حرارية مرتفعة وعند حوالي ١٠٥٠ °م، الخليط يحـتوي ٩٩,٦% CO، فقط ٠,٤ % CO_2. لذلك فإنه لإنتاج (CO)، فإن درجة الحرارة الإنتاج يجب أن تكون عند ١٠٥٠ °م.

ولكن، التفاعل الكلي المؤدي إلى تكون (CO) هو تفاعل منتج للحرارة. بسبب هـذا، فإن درجة حرارة طبقة الوقود ترتفع إلى حد أن الرماد في طبقة الوقود ينصهر ويـتكون كـرات الكلنكـر. هذا الكلنكر يربك توزيع الهواء، ويغمر الكربون الذي لم يحترق ويقلل من كفاءة العملية. بالإضافة إلى أن درجة الحرارة العالية يمكن أن تؤثر على البطانة الحرارية. لتجنب هذه المشاكل، فإنه يستخدم الهواء المخلوط مع البخار.

استخدام البخار في تيار الهواء يقلل درجة حرارة طبقة الوقود بالتفاعلات الآتية:

$$(1) \qquad C_{(s)} + H_2O_{(g)} \leftrightarrow CO_{(g)} + H_{2(g)} \qquad \Delta H = 28.4\ kcaL$$

$$(2) \qquad C_{(s)} + 2H_2O_{(g)} \leftrightarrow CO_{2(g)} + H_{2(g)} \qquad \Delta H = 18.6\ kcaL$$

هذين التفاعلين هما من التفاعلات المنتجة للحرارة بما يقلل من درجة حرارة طبقة الوقود. تفاعل غاز ا لماء (١) يسود عند ١٠٠٠ °م ويكون أكثر حيـث التفاعل (٢) يفـضل عـند درجات الحرارة المنخفضة. حيث أن CO_2 هو تكون غير مرغوب (غيـر قابـل للاحتراق)، فإن درجة حرارة يجب أن تظل أعلى من ١٠٠٠ °م وذلك لإيقاف التفاعل (٢). في الواقع، فإنه يجب استمرار الاتزان بين إمداد الهواء والبخار وذلـك للمحافظـة علـى درجة حرارة غاز الإنتاج عند ١٠٠٠ °م، والذي هو أساسا لتفاعل الأكسدة.

منطقة التقطير:

هذه هي أعلى منطقة عند درجة الحرارة من ٤٠٠ – ٨٠٠ °م وتعمل كمنطقة تـسخين مـسبق. في هذه المنطقة الكوك/ الفحم الذي يهبط يتم تسخينه بواسطة غاز

الإنتاج الخارج. بخار الماء والمادة المتطايرة للوقود يتم إضافتهم إلى الغاز الخارج. بعض من CO يمكن كذلك أن يتفاعل مع البخار في هذه المنطقة.

$$CO_{(g)} + H_2O_{(g)} \leftrightarrow CO_2 + H_2 \qquad \Delta H = -10 \text{ kcal}$$

هذا تفاعل غير مرغوب فيه والذي يرفع تركيز غاز (CO_2) الخامل ويقلل القيمة الحرارية للمنتج.

المكونات: (composition)

المكون الصحيح لغاز الإنتاج يتوقف على نوع الوقود، مكونات الهواء + البخار ومختلف العمليات الأخرى. متوسط مكونات غاز الإنتاج هو CO = ٢٢ – ٣٠ %، H_2 = ٨ – ١٢%، N_2 = ٥٢ – ٥٥%، CO_2 = ٣%.

الاستخدام: uses

١. أرخص وقود غاز، يمكن تصنيعه من مخلفات الخشب، نشارة الخشب، من الفحم البني ومن فحم المستنقعات.
٢. يستخدم كوقود لأفران الجمرة المفتوحة (في صناعة الزجاج وفي صناعة الصلب)، الأفران اللافحة، المعوجات (يستخدم في تصنيع الكوك والفحم....الخ). الغاز الخام الساخن يتم تغذيته مباشرة في الفرن.
٣. يستخدم كعامل اختزال في العمليات الميتاليرجية.

غاز الماء: (Water Gas) شكل (١/٢٣)

غاز الماء يسمى عادة الغاز الأزرق لأنه يحترق بلهب أزرق. وهو يتكون أساساً من خليط من أول أكسيد الكربون والهيدروجين. لأن كلا المكونين قابل للاحتراق فإن لهما قيمة حرارية عالية ٢٨٠٠ كيلو سعر/ المتر المربع، عن غاز الإنتاج. فهو ينتج بمرور البخار فوق الكوك الأحمر الساخن عند حوالي ١٠٠٠ °م.

$$C + H_2O \rightarrow \underbrace{CO + H_2}_{\text{غاز ماء}} \qquad \Delta H = +28 \text{ kcal}$$

التفاعل السابق هو عملية منتجة للحرارة. لذلك يلزم كمية كبيرة من الحرارة

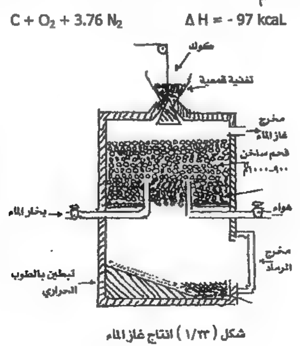
لاســتمرار درجة الحرارة الفرن. ولكن الإمداد بالحرارة المطلوبة خارجيا يكون غير اقتصادي جدا. لذلك فإن إنتاج ماء الغاز يتم في عملية حلقية، تشمل خطوتين. في أحد الخطوتــين، يــتم توليد الحرارة لرفع درجة الحرارة للطبقة بنفخ الهواء وفي الخطوة الأخرى يتم دفع البخار وتكوين غاز الماء يتم مع امتصاص الحرارة – تلك الخطوتين تسمى فترات النفخ ودورة معالجة (blow and run) على التوالي.

التصنيع:

يتكون مولد الغاز من اسطوانة من الصلب مبطنة ببطانة من الحراريات. ولها قمع للتغذية من أعلى. مخرج غاز الماء يكون كذلك قريبا من القمة. المولد له مدخلين منفصلين لنفخ الهواء والبخار. القاع مجهز لخروج الرماد. دورة العمل تتكون من الخطوتين الآتيتين:

١. يتم مرور الهواء خلال طبقة الكوك عند احتراق كربون الكوك لإنتاج CO_2 – نظــرا لأن الــتفاعل منتج للحرارة فإن درجة حرارة طبقة الوقود تزداد إلى حوالي ١٠٠٠ °م

$$C + O_2 + 3.76\ N_2 \qquad \Delta H = -97\ kcaL$$



شكل (١/٢٣) انتاج غاز الماء

٢. عــند الوصول إلى درجة الحرارة المرتفعة الكافية (١٠٠٠ °م)، يتم توقــف تــيار الهواء ودفع بخار الماء خلال الكوك الأحمر الساخن لتكوين H_2, CO

$$(1) \quad C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2 \qquad \Delta H = +28.7 \text{ kcaL}$$

$$(2) \quad C + 2H_2O \leftrightarrow CO_2 + 2H_2 \qquad \Delta H = +18.6 \text{ kcaL}$$

التفاعل (١) يسود عند درجات الحرارة العالية ويكون تفاعل مرغوبا فيه. بينما التفاعل (٢) يــسود عند درجات الحرارة المنخفضة. بسبب التفاعل الذي يمتص حرارة لهذه التفاعلات، فإن درجة حرارة طبقة الوقود منخفض والتفاعل الغير مطلوب (٢) يحدث. فــي هــذه المرحلة، يتم توقف إمداد البخار ودفع الهواء ثانيا لرفع درجة الحرارة إلى ١٠٠٠ – ١١٠٠ °م.

تلــك الخطوتين يتم بذلك تكرارهما بالتبادل لاستمرار درجة الحرارة المناسبة. الفترة الــزمنية لدفــع بخــار الماء (النفخ البارد) عادة ٤ دقائق بينما فترة نفخ الهواء (النفخ الساخن) هو حوالي ١ – ٢ دقيقة.

المكونات:

متوســط المكونات لغاز الماء هو H_2 = ٥١%، CO = ٤١%، N_2 = ٤%، CO_2 =٤%.

غاز الماء يعطي لهب أزرق بسبب زيادة المحتوى من أول أكسيد الكربون، درجة حرارة اللهب حوالي ١٨٠٠ °م.

الاستخدام:

- يستخدم كمصدر للهيدروجين لتخليق الأمونيا.
- يستخدم كوقود للأفران.
- عند الخلط مع الهيدروجين يستخدم في صناعة الميثانول.
- يستخدم طريقة فيشر تروبش لإنتاج منتج شبيه بالبترول.

- ماء الغاز يستخدم كذلك لتحضير ماء الغاز المكربن والذي يمكن استخدامه في أغراض التسخين والإضاءة.

غاز الماء المكربن: (Carburreted Water Gas) شكل (١/٢٤)

القيمة الحرارية للغاز الأزرق منخفضة جدا حيث تكون غير مؤثرة كوقود غاز، ولذلك يتم زيادة قيمتها الحرارية بغازات الهيدروكربونات التي يتم الحصول عليها بتكسير زيت البترول. غاز الماء المستخدم للتقوية يسمى غاز الماء المكربن.

<u>التصنيع:</u>

يتكون جهاز تصنيع غاز الماء المكربن من وحدتين إضافيتين وهما المكربن (carburetter) والسخان الفائق (super heater) بجانب مولد غاز الماء الذي تم مناقشته.كل من المكربن ووحدة التسخين الفائق عبارة عن أوعية من الصلب المبطن بالطوب الحراري مع نظام بناء من الطوب الترابيعي (checker brick) لتوفير سطح تكثيف التبادل الحراري. إنتاج غاز الماء المكربن يمكن شرحه في ثلاث خطوات:

- عند مرور الهواء خلال طبقة الكوك في المولد، وارتفاع درجة الحرارة بسبب التفاعل المنتج للحرارة.

$$C + \underbrace{O_2 + 3.76\ N_2}_{\text{هواء}} \rightarrow CO_2 + 3.76\ N_2 \qquad \Delta H = -97\ kcaL$$

- الغازات الساخنة المنتجة يتم توجيهها إلى المكربن، والذي يعمل على تسخين الطوب، الحوائط الجانبية والقبو. تيار من الهواء الثاني يتم دفعه في المكربن لحرق تيار الغازات وإنتاج حرارة أكثر. الحرق يتم في وحدة التسخين الفائق (super heater). غازات الحرق تدخل عندئذ غلاية استخدام الحرارة (waste heat) ثم أخيرا تتصرف خلال المدخنة.
- عند الوصول إلى درجة حرارة كافية في المولد، المكربن، وحدة التسخين الفائق،يتم إيقاف تيار الهواء ودفع البخار خلال الكوك

الأحمر الساخن. غاز الماء المنتج، كما تم وصفه سابقا، يتم توجيهه إلى المكربن. في نفس الوقت يتم رش الزيت في المكربن، والذي يتبخر ويتكسر. نتيجة التكسير تختلط مع غاز الماء.

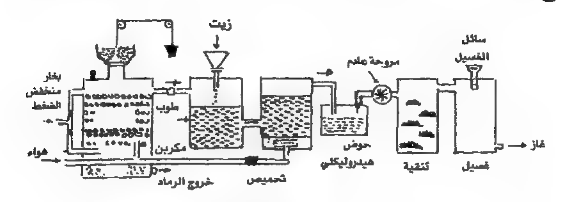
- خليط الغازات يمر على وحدة التسخين الفائق حيث يستمر التكسير للزيت الذي يتحول إلى الحالة الغازية ويصبح التكسير تاما. غاز الماء مع أبخرة الزيت التي تم تكسيرها يكون غاز الماء المكربن الذي يتم توجيهه إلى خط هيدروليكي وجهاز التنقية. الزيت المستخدم في الكربنة يكون عادة جزء عالي من البترول يتكون أساسا من البارافينات ذات درجة حرارة غليان من ٢٠٠ – ٣٠٠ ° م. الزيوت الأثقل أحيانا يتم استخدامها.

المكونات:

متوسط المكونات لغاز الماء المكربن هي CO = ٢٣ – ٢٨ %، H_2 = ٣٤ – ٣٨% ، الهيدروكـــربونات (المشبعة والغير مشبعة) = ٣٠ – ٣٨% ، CO_2 = ٠,٢ – ٢,٥% ، N_2 = ٢,٥ – ٥% طاقـــته الحـــرارية حوالـــي ٣٥٠٠ – ٤٤٥٠ كيلو سعر حراري/ م^{٣} .

الاستخدامات:

- يستخدم كمصدر للحرارة حيث يمتلك قيمة حرارية مرتفعة.
- يستخدم لأغراض الإضاءة.
- يستخدم كبديل لغاز الفحم.



شكل (١/٢٤) وحدة كربنة غاز الماء

غاز الفحم (غاز فرن الكوك): Coal Gas (Coke Oven Gas) شكل (١/٢٥)

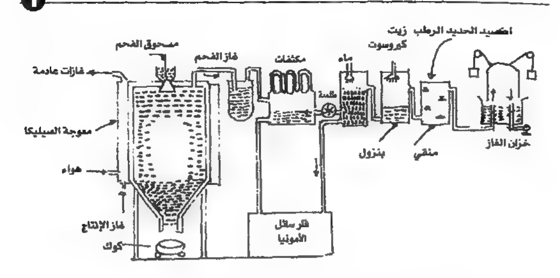
غــاز الفحــم وغاز فرن الكوك يتم الحصول عليهما بكربنة الفحم عند درجة الحــرارة العالــية. كربنة الفحم تؤدي إلى تصاعد منتجات غازية. الغاز المنتج من معــوجات إنــتاج الغاز يسمى غاز الفحم بينما الغاز المنتج من أفران صناعة الكوك يسمى غاز فرن الكوك. كلاهما متشابهة جدا. الفرق يرجع إلى طبيعة الفحم المستخدم وكذلك إلى حالات الكربنة المختلفة. غاز الفحم يتم تصنيعه بتسخين الفحم الغني بالمواد المتطايــرة (٣٠ – ٤٠%) في معوجات أفقية أو رأسية حتى ١٣٥٠ °م والغاز يكون هو المنتج الرئيسي.

١٣٠٠ °

فحم ⟵ كوك + غاز الفحم ↑

في معزل عن الهواء

مخطــط للعملــية موضح في الشكل (١/٢٥). الغاز المنتج يحتوي على عدد كبيــر مــن الملــوثات ذات القيمة والتي تزال من غاز الفحم أساسا بسبب قيمتها في الاستخدام. بالإضافة إلى أن إزالتها تحسن نوعية الغاز.



شكل (١/٢٥)صناعة غاز الفحم

الغــاز (عــند حوالــي ٧٠٠ – ٨٠٠ °م) يــتم تمريــره خلال خط مواسير هيدروليكــي حيث يحدث تكثف لبعض من القار والأمونيا. المسار الهيدروليكي يعمل كذلك مانع للماء حيث يمنع مرور الغازات إلى الخلف نحو المعوجة.

يتم توجيه الغاز إلى مكثف ضخم حيث يتم إزالة كثيرا من القار والأمونيا ويتم جمعهم ســفليا فــي طبقتين منفصلتين في خزان قار الفحم من غاز الفحم يعتبر مصدر غني بالكيماويات.

يــتم عــندئذ تمريــر الغازات خلال أبراج الغسيل (scrubber) تحت الضغط بمــساعدة طلمبة العادم. عندئذ يتم سريعا تبريد الغازات الساخنة برشها بنافورات من الماء عند الضغط المرتفع عند إزالة النفثالين (naphthalene).

غــازات الفحــم يتم مرورها خلال برج غسيل آخر حيث يتم الغسيل باستخدام زيت الكــرى أوزوت (creosote oil) (وهــو زيــت معالجة الخشب) والذي يذيب البنزول (Benzol)، التولوين ومركبات أروماتية أخرى.

يــتم تنقــية الغاز بإزالة الكبريت وكبريتيد الهيدروجين بمروره فوق أكسيد الحديديك الموجود في وحدة التنقية.

$$Fe_2O_3 + 3H_2S \rightarrow Fe_2S_3 + 3H_2O$$

عند استنفاذ Fe_2O_3 يتم سحبه من وحدة التنقية وتعريضه للهواء حيث يتأكسد إلى Fe_2O_3

$$Fe_2S_3 + 3O_2 \rightarrow 3Fe_2O_3 + 6S$$

غاز الفحم بذلك يكون قد تم تنقيته وتخزينه فوق خزان الغاز فوق الماء.

المكونات:

مكونات غاز الفحم هي H_2 = ٤٠%، CH_4 = ٣٢%، CO = ٧%، C_2H_2 = ٢%، C_2H_4 = ٣%، N_2 = ٤%، CO_2 = ١%، الباقي = ٤%. قيمته الحرارية هي حوالي ٤٩٠٠ كيلو سعر حراري/ م٣. غاز الفحم أخف من الهواء ويحترق بلهب مدخن. إنتاجية الغاز تتوقف على درجة حرارة وطبيعة الفحم المستخدم.

الاستخدامات:

- يستخدم غاز الفحم أساسا كوقود.
- كما يستخدم في الإضاءة. قوة الإضاءة في غاز الفحم ترجع إلى وجود الهيدروكربونات الغير مشبعة.
- يستخدم كذلك في توفير جو الاختزال في مختلف العمليات الميتاليرجية.
- بسبب قيمته الحرارية العالية يستخدم كذلك في صهر المعادن. والسبائك.
- يعتبر غاز فرن الكوك أرخص مادة خام لإنتاج الأمونيا.

غاز الزيت: Oil Gas

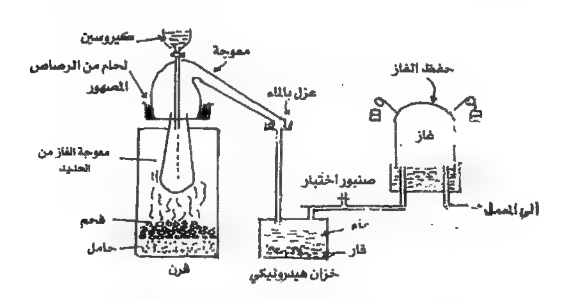
الوقود الغاز يمكن كذلك الحصول عليه من تجزئة البترول. يتكون غاز زيت البترول من خليط من الهيدروكربونات ويتم تحضيره بالتكسير الحراري للكيروسين.

$$\underset{\text{زيت الكيروسين}}{C_{12}H_{26}} \xrightarrow{\text{تكسير}} \underset{\text{(خليط من الهيدروكربونات الصغرى) (غاز الزيت)}}{CH_4 + C_2H_6 + C_2H_4 + C_3H_8 + C_3H_6} + \underset{\text{قار}}{C}$$

التصنيع: شكل (١/٣٦)

تتكون محطة المعالجة من معوجة قوية من الحديد الزهر، المحتجزة في فرن الإشعال بالفحم. ذراع المعوجة (bonnet) يثبت عند فوهتها خلال عازل من الرصاص المنصهر، ويكون متصلا بحوض هيدروليكي خلال عزل الماء.

يتم تدريجيا إدخال تيار رقيق من زيت الكيروسين إلى معوجة الحديد الحمراء الساخنة، حيث يتم التسخين الشديد للزيت ويحدث له التكسير الحراري منتجا خليط من الهيدروكربونات الصغرى مثل الميثان، الإيثان، الإيثيلين....الخ. ينتج كذلك مواد القار (tarry) والتي تختلط مع الهيدروكربونات الغازية. الغازات التي تكونت تمر إلى الخارج خلال غطاء (bonnet) إلى الحوض الهيدروليكي. يحدث تكثف للقار وإزالته. درجة الاكتمال لعملية التكسير يتم اختبارها بسحب بعض من الغاز خلال صنبور الاختبار و اختبار لونه. الزيت الجيد يبدو بلون أصفر ذهبي. بضبط الإمداد بالكيروسين والهواء، يمكن الحصول على اللون المطلوب. يتم تخزين غاز الزيت في اسطوانات حفظ الغاز.



شكل (١/٣٦) التحضير المعملي لغاز الزيت

المكونات:

متوسـط مكونات غاز الزيت هو CH_4 = ٢٥ – ٣٠٪ ، H_2 = ٥٠ – ٥٥٪ ، CO = ١١٪ ، CO_2 = ٣٪.

القيمة الحرارية لغاز الزيت هي حوالي ٦٧٠٠ كيلو سعر حراري/ م^{٣}.

الاستخدام:

- يستخدم كغاز معملي.
- يستخدم كذلك لزيادة القيمة الحرارية لغاز الماء (غاز الماء المكربن).

جدول ( ) المكونات والقيمة الحرارية للوقود الغاز

م	الوقود	متوسط المكونات	تفاعلات التصنيع	القيمة الحرارية كيلو سعر حراري/ م^٣
١	الغاز الطبيعي natural gas	CH_4 ، %٩٠ – ٧٠ C_2H_6=% ١٠–٥ = H_2 =%٣ CO_2 + CO=الباقي.،		١٤٠٠٠ – ١٢٠٠٠
٢	غاز الإنتاج producer gas	CO =%٣٠–٢٢ ، H_2 =%١٢ – ٨ ، N_2 = %٥٥ – ٥٢ ، CO_2=%3	أكسدة $C + O_2 + 3.76\ N_2 \rightarrow CO_2 + 3.76\ N_2$ $C + 1/2\ O_2 + 1.88\ N_2 \rightarrow CO + 1.88\ N_2$ اختزال $CO_2 + C \leftrightarrow 2CO$ $C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$ $C + 2H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	١٣٠٠

م	الوقود	متوسط المكونات	تفاعلات التصنيع	القيمة الحرارية كيلو سعر حراري/ م٣
٣	غاز الماء water gas	H_2 ، ٥١% = CO، ٤١% = N_2 = ٤% ، CO_2 = ٤%.	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	٢٨٠٠
٤	غاز الماء المكربن ←	CO = ٢٣ – ٢٨ %، H_2 = ٣٨ – ٤٠% ، هيدروكربونات = ٣٠ – ٤٨% ، CO_2 = ٠,٢ – ٢,٥% ، N_2 = ٢,٥ – ٥%	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$ تكسير زيت ← هيدروكربونات	٣٥٠٠ – ٤٤٥٠
٥	غاز الفحم	H_2 = ٤٠% ، CH_4 = ٣٢% ، CO = ٧% ، C_2H_2 = ٢% ، C_2H_4 = ٣% ، N_2 = ٤% ،	$Coal \xrightarrow{1300^\circ م} coke + coal\ gas$	٤٩٠٠

م	الوقود	متوسط المكونات	تفاعلات التصنيع	القيمة الحرارية كيلو سعر حراري/ م٣
		CO_2 = ١%، الباقي = ٤%		
٦	غاز الزيت	CH_4 = ٢٥ – ٣٠%، H_2 = ٥٠ – ٥٥%، CO = ١١%، CO_2 = ٣%.	تكسير $C_{12}H_{26} \rightarrow CH_4 + C_2H_6 + C_2H_6 + C_2H_2 + C_3H_8$	٦٧٠٠

الاشتعال: (combustion)

الاشتعال هو عملية كيميائية يصاحبها انطلاق حرارة وضوء. وهو بالتأكيد تفاعل منتج للحرارة (exothermic). مثال :

$C_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)}$ $\Delta H = -97$ kcaL

لتأكيد الاشتعال الكامل فإن المادة يجب أن تصل إلى درجة حرارة الاشتعال. تعرف درجة حرارة الاشتعال بأنها أقل درجة حرارة التي عندها تشتعل المادة وتحترق بدون إضافة أخرى للحرارة من الخارج.

حساب الهواء اللازم للاشتعال:

كمـــية الأكـــسجين والهواء اللازم للحرق للاشتعال الكامل لكمية معينة من الوقود يمكن حسابها على أساس المبادئ الآتية:

١. يحدث دائما للمواد الاشتعال الكامل بواسطة المعرفة الجيدة للتفاعلات الكيميائـــية الكلية أي أن المواد دائما تتحد بنسب محددة. فمثلا، حرق الكربون يمثل بالمعادلة الآتية:

$$C_{(s)} + O_2(g) \rightarrow CO_{2(g)} \qquad \Delta H = -97 \text{ kcaL}$$

١٢جرام بالوزن ٣٢جرام ٤٤جرام

١حجم ١حجم ١حجم

هذه المعادلة تبين أن:

١٢ جـــزء بالـــوزن من الكربون تتحد مع ٣٢ جزء بالوزن من الأكسجين لإنتاج ٤٤ جزء بالوزن من ثاني أكسيد الكربون أو حجم واحد من الكربون بتفاعل مع حجم واحد من الأكسجين لإنتاج حجم واحد من ثاني أكسيد الكربون.

لـــذلك فإنـــه من المعادلة الكيميائية، يمكن حساب كمية الأكسجين (بالوزن أو بالحجم) يمكـــن حـــسابها بـــسهولة. المعادلة الكيميائية المتوازنة لمعظم مكونات أي وقود هي كالآتي:

$H_2 + 1/2\ O_2 \rightarrow H_2O$

$S + O_2 \rightarrow SO_2$

$CO + 1/2\ O_2 \rightarrow CO_2$

$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$

$2C_2H_6 + 7O_2 \rightarrow 4CO_2 + 6H_2O$

$C_2H_4 + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 2\ H_2O$

$2C_2H_2 + 5O_2 \rightarrow 4CO_2 + 2H_2O$

النيتـــروجين أو الرماد في الوقود هي مواد غير قابلة للاشتعال ولذلك فإنها لا تستهلك الأكسجين.

٢. مــن الناحــية العملــية: يــتم الاشتعال في وجود الهواء. لذلك فإنه من كمية الأكــسجين المطلــوبة (عند حسابها طبقا للتفاعلات السابقة) من الهواء يمكن حــسابها. أســاس هذا الحساب هو حقيقة أي الهواء يحتوي على ٢١% من الأكسجين بالحجم و ٢٣% بالوزن، الباقي هو النيتروجين.

لــذلك ١ م^{٣} مــن الأكسجين يتم توفيره عن ١ x ١٠٠/٢١ = ٤,٧٦ م ^{٣} من الهواء، بالمــثل ١ كجــرام من الأكسجين يتم توفيره من ١ x ١٠٠/٢٣ = ٤,٣٥ كجرام من الهواء.

٣. متوسط الوزن الجزيئي للهواء مقدر ٢٨,٩٤ جزئ $^{-١}$ ($28.94\ Mol^{-1}$).

٤. مكونات الوقود السائل أو الصلب عادة يعبر عنها بالوزن بينما مكونات الوقود الغاز يعبر عنها بالحجم. كتل المواد الغازية يمكن حسابها طبقا لقوانين الغاز وقانون أفوجادرو.

أ- قانــون أفــواجادرو - ٢٢,٤ لتــر من أي غاز عند الضغط ودرجة الحرارة القياسي (STP) أي (٢٧٣ كلفن، ٧٦٠ مليمتر زئبق) له كتلة تــساوي جزئ واحد منه. لذلك فإن الضغط القياسي ودرجة الحرارة القياســية لـــ ٢٢,٤ لتر من الكربون تزن ١٢ جرام والتي هي كتلة جزئ واحد من الكربون.

ب- كــتلة أي غــاز يمكن تحويلها إلى حجمه عند ضغط معين ودرجة حرارة معينة باستخدام المعادلة $PV = nRT$

حيث:

P = ضغط الغاز

V = حجم الغاز

R = ثابت الغاز

T = درجة الحرارة بمقياس كيلفن

n = عدد جزيئات الغاز

جـــ- قانــون بويل وقانون شارل يمكن استخدامهما في خفض حجم الغاز عند ضغط معلوم ودرجة حرارة معلومة إلى الحجم المقابل عند أي حالة أخرى من درجة الحرارة والضغط باستخدام المعادلة:

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$$

حيث:

P_1 ، V_1 ، T_1 هــم الـضـغط والحجم ودرجة الحرارة الأولية للغاز، P_2 ، V_1 ، T_2 هم الضغط والحجم ودرجة الحرارة النهائية للغاز.

(د) الأوزان النسبية لغازين أو أكثر يتم تحويلهم إلى الحجم المقابل بالعلاقة:

الحجم النسبي للغازات = (وزن الغاز A / الوزن الجزيئي للغاز A) : (وزن الغاز B / الوزن الجزيئي للغاز B)

(هـ) أقل أكسجين مطلوب = الأكسجين النظري المطلوب – الأكسجين الموجود في الوقود.

أدنـــى أكـسجين مطلوب يتم حسابه على أساس الحرق الكامل. في حالة عدم الحرق الكامــل، تحتوي المنتجات على CO. في مثل هذه الحالة، يتم حساب الأكسجين الزائد بعد طرح كمية الأكسجين اللازمة لحرق CO إلى CO_2.

(و) الحــرق نادرا ما يحدث بكفاءة بالحساب النظري لكمية الهواء. دائما يستخدم هواء زائد في الفرن.

نسبة الهواء الزائد% = (الهواء الحقيقي المستخدم – الهواء النظري المطلوب) / الهواء النظري

(ز) الأكـسجين الموجــود في الوقود يوجد متحد مع الهيدروجين. لذلك فإن هذه الكمــية مــن الهيدروجــين المتحدة مع الأكسجين الموجود في الوقود، لا تساهم في الحرق. باقي الهيدروجين يسمى الهيدروجين المتاح (available hydrogen) يساهم فقط في تفاعل الحرق.

$$H_2 + 1/2\, O_2 \rightarrow H_2O + Heat$$

(١٦جرام) (٢جرام)

حـيث أن جـزء واحد من الهيدروجين يتحد مع ٨ أجزاء من الأكسجين أو بمعنـى آخر لكل ٨ أجزاء من الأكسجين الموجود فإنه يحدث تثبيت لجزء واحد من الهيدروجين لذلك فإن الهيدروجين المتاح = [وزن الهيدروجين – وزن الأكسجن] / 8

لذلك، فكمية الأكسجين النظرية اللازمة للحرق الكامل لواحد كيلو جرام من الوقود =

$$\left[S + \left(\tfrac{s}{8} - H\right)\frac{16}{12} + C\frac{32}{12}\right]\frac{100}{23}$$ كجرام

حـيث C ، H ، O ، S تمثل الكربون، الهيدروجين، الأكسجين، الكبريت على التوالي.

ولذلك فإن الكمية النظرية من الأكسجين اللازم لحرق واحد كيلو من الوقود =

$$\left[S\left(\tfrac{s}{8} - H\right)\frac{16}{2} + C\frac{32}{12}\right]\frac{100}{23} \times 32$$ كجرام

أمثلة محلولة مبنية على الحرق:

مثال:

احسب وزن وحجم الهواء اللازم لحرق ٢ كجرام من الكربون.

أولا:

الوزن الجزيئي لبعض العناصر:

C = ١٢ ، H_2=٢ ، O_2 = ٣٢ ، S = ٣٢ ، H_2O = ١٨ ، N_2= ٢٨

الحل:

تفاعل الحرق $C + O_2 \rightarrow CO_2$

وزن الأكسجين المطلوب لحرق ١٢ كجرام من C = ٣٢ كجرام

إذن وزن الأكسجين اللازم لحرق ١ كجرام من C = ٣٢ / ١٢ = ٢,٦٧ كجرام

إذن وزن الهواء المطلوب = ٢,٦٧ x ١٠٠ = ١١,٦ كجرام = ١١٦٠٠ جرام

٢٣

إذن حجم الهواء المطلوب لحرق ٢ كجرام من الكربون =

١١٦٠٠ x ٢٢,٤ لتر = ١١٦٠٠ x ٢٢,٤ لتر

الوزن الجزيئي للماء ٢٨,٩٤

= ٨٩٧٨,٦ لتر = ٨,٩٧ متر مكعب

مثال:

احسب أدنى كمية من الهواء اللازمة للحرق الكامل لـ ١٠٠ كجرام من الوقود المحتوي على C = ٨٠%، H_2 = ٦% ، O_2 = ٥% ، S = ٢% ، والباقي N_2 بالوزن.

الحل:

المكون	الكمية%	تفاعل الاحتراق	وزن O_2 المطلوب
C	٨٠	$C + O_2 \rightarrow CO_2$ ١٢ جرام ٣٢ جرام	٣٢/ ١٢ * ٨٠ = ٢١٣,٣
هيدروجين	٦	$H_2 + 1/2\, O_2 \rightarrow H_2O$ ٢جرام ١٦ جرام	١٦/٢ * ٦ = ٤٨
كبريت	٢	$S + O_2 \rightarrow SO_2$ ٣٢ جرام ٣٢ جرام	٣٢/ ٣٢ * ٢ = ٢
أكسجين	٥	– –	

النيتروجين لا يحترق ولذلك فإنه لا يستهلك أكسجين. الأكسجين المطلوب نظريا لكل ١٠٠ كجرام من الوقود = ٢١٣,٣ + ٤٨ + ٢ = ٢٦٣,٣ كجرام من O_2.

الكمية الصافية المطلوبة = O_2 الموجود – O_2 الموجود في الوقود = ٢٦٣,٣ – ٥ = ٢٥٨,٣ كجرام من O_2.

إذن الهواء المطلوب = ٢٥٨,٣ * ٢٣/١٠٠ = ١١٢٣ كجرام

مثال:

احسب حجم الهواء اللازم للحرق التام لواحد متر مكعب من الوقود الغاز بالمكونات: CO = ٤٨% ، CH_4 = ٨% ، H_2 = ٤٠% ، C_2H_2 = ٢% ، N_2 = ١% والباقي رماد.

الحل:

المكون	الكمية	تفاعل الحرق	حجم O_2 المطلوب
CO	٠,٤٤٨	$CO \leftarrow 0.5\,O_2 + CO_2$ ١/٢جزئ ١جزئ	٠,٤٨ × ٠,٥ = ٠,٢٤ م٣
CH_4	0.08	$CH_4 + 2\,O_2 \rightarrow CO_2 + 2\,H_2O$ ٢جزئ ١جزئ	٠,٠٨ × ٢ = ٠,١٦ م٣
H_2	0.4	$H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O$ 1/2 جزئ ١جزئ	٠,٤ × ٠,٥ = ٠,٢ م٣
C_2H_2	0.02	$C_2H_2 + 5/2\,O_2 \rightarrow 2CO_2 + H_2O$ ٢/٥جزئ ١جزئ	٠,٠٢ × ٢/٥ = ٠,٥ م٣

الحجم الكلي للأكسجين المطلوب = ٠,٢٤ + ٠,١٦ + ٠,٢ + ٠,٠٥ = ٠,٦٥ م٣

حجم الهواء المطلوب = ٠,٦٥ × ١٠٠/٢١ = ٣,٠٩٥ م٣

مثال:

غاز له المكونات الآتية بالحجم: CO = ٢٠% ، CH_4 = ٤% ، H_2 = ٢٢% ، CO_2 = ٦% ، O_2 = ٣% ، N_2 = ٤٥%. إذا كان ٢٥% هواء زائد مستخدم. أوجد وزن الهواء الذي يتم الإمداد به حقيقة لكل متر مكعب من هذا الغاز.

الحل:

حجم الغازات في ١ م٣ هو: CO = ٢٠ م٣، CH_4 = ٠,٠٤ م٣، H_2 = ٠,٢٢ م٣، CO_2 = ٠,٠٦ م٣، O_2 = ٠,٠٣ م٣ ، N_2 = ٠,٤٥ م٣.

المكون	الكمية	تفاعل الاحتراق	حجم O_2 المطلوب
H_2	٢٢	$H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$	٠,٢٢× ٠,٥= ٠,١١ م^٣
CH_4	0.04	$CH_4 + 2\ O_2 \rightarrow CO_2 + 2\ H_2O$	٠,٠٤ × ٢= ٠,٠٨ م^٣
CO	٠,٢	$CO + 1/2\ O_2 \rightarrow CO_2$	٠,٢ × ٠,٥ = ٠,١ م^٣
CO_2	٠,٠٦		
O_2	٠,٠٦		
N_2	٠,٤٥		

حجم O_2 المطلوب = (١١ + ٠,٠٨ + ٠,١) – ٠,٠٣ = ٠,٢٦ م^٣

حجم الهواء المطلوب = ٠,٢٦ × ١٠٠/٢١= ١,٢٣٨ م^٣

الحجم الحقيقي للهواء الذي يتم الإمداد به = ١,٢٣٨ × ١٢٥/١٠٠ = ١,٥٤٧٥ م^٣

= ١٥٤٧,٥ لتر

الوزن الحقيقي للهواء الذي يتم الإمداد به = ١٥٤٧,٥/٢٢,٤ × الوزن الجزئي للهواء

= ١٥٤٧,٥/٢٢,٤ × ٢٨,٩٤ جرلم = ١٩٩٩,٣ جرام

= ١,٩٩٩ كيلوجرام

مثال:

المكون بالحجم لعينة وقود هي: CO = ٦% ، CH_4 = ٣٠% ، H_2 = ٢٤%، CO_2 = ٨%، O = ٢% ، N_2 = ١٢% ، C_2H_6 = ١١% ، C_2H_4 = ٤,٥%.

ما هي الكمية النظرية من الهواء اللازمة عند ٢٥ °م، ضغط ٧٥٠ مليمتر للحرق الكامل لمتر مكعب واحد من الوقود.

الحل:

المكون	الكمية	تفاعل الاحتراق	حجم O_2 المطلوب
H_2	٠,٢٤	$H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$	٠,٢٤ × ٠,٥ = ٠,١٢ م٣
CH_4	٠,٣	$CH_4 + 2\ CO_2 \rightarrow CO_2 + 2\ H_2O$	٢ × ٠,٣ = ٠,٦
CO	٠,٠٦	$CO + 1/2\ O_2 \rightarrow CO_2$	٠,٠٦ × ٠,٥ = ٠,٠٠٣ م٣
CO_2	٠,٠٨	—	—
O_2	٠,٠٢	—	—
N_2	٠,١٢	—	—
C_2H_6	٠,١١	$C_2H_6 + 3.5\ O_2 \rightarrow 2\ CO_2 + 3\ H_2O$	٠,١١ × ٣,٥ = ٠,٣٨٥
C_2H_4	٠,٠٤٥	$C_2H_4 + 3\ O_2 \rightarrow 3\ CO_2 + 2\ H_2O$	٠,٠٤٥ × ٣ = ٠,١٣٥
C_4H_8	٠,٠٢٥	$C_4H_8 + 6\ H_2O \rightarrow 4\ CO_2 + 4\ H_2O$	٠,٠٢٥ × ٦ = ٠,١٥

إجمالي الحجم المطلوب من الأكسجين للحرق =

= ٠,٠١٢ + ٠,٠٠٣ + ٠,٦ + ٠,٣٨٥ + ٠,١٣٥ + ٠,١٥ – ٠,٠٢

= ١,٤ م٣ عند الضغط ودرجة الحرارة العادية.

حجم الأكسجين المطلوب عند درجة الحرارة والضغط المعطى

Po = ٧٦٠ مليمتر P_1 = ٧٥٠ مليمتر

Vo = ١,٤ م٣ V_1 = ؟

To ـ كيلفن T_1= ٢٩٨ كيلفن

V_1 = ١,٤ × ٧٦٠ × ٢٩٨ = ١,٥٤٨ م٣
        ٢٧٣   ٧٥٠

الحجم المطلوب من الهواء = ١,٥٤٨ × ٢١/١٠٠ = ٧,٣٧١ م٣

مثال:

عينة من الفحم وجد أن لها المكونات الآتية:

C = ٧٥%، H = ٥,٢ %، O = ١٢,١%، N = ٣,٢%، رماد = ٤,٥%.

١. احسب أقل كمية مطلوبة من الهواء للحرق الكامل لواحد كيلوجرام من الفحم.

٢. احسب أعلى قيمة حرارية وأقل قيمة حرارية لعينة الفحم (إجمالي القيمة الحرارية بالكيلو سعر حراري/ الكيلو جرام: C = ٨٠٨٠ ، H = ٣٤٥٠٠، S = ٢٢٤٠.

الحل:

١. الكيلوجرام من الفحم يحتوي: C = ٧٥٠ جرام، H = ٥٢ جرام، O = ١٢١ جرام، N = ٣٢ جرام، الرماد = ٤٥ جرام.

أدنى وزن من الهواء مطلوب للحرق الكامل للكيلوجرام من الفحم

= وزن لـــ [C × (١٢/٣٢)+ H (٢/١٦) – o] × (٢٣/١٠٠)

= [٧٥٠ جرام × (١٢/٣٢) + H × (٢/١٦) – ١٢١ جرام] ×(٢٣/١٠٠)

= [٢٠٠٠ جرام + ٤١٦ جرام – ١٢١ جرام] × (٢٣/١٠٠)

= ٢,٢٩٥ جرام × (٢٣/١٠٠) = ٩,٩٧٨ جرام = ٩,٩٧٨ جرام

٢. أعلى قيمة حرارية =

= ١/١٠٠ [٨٠٨٠ × C + ٣٤٥٠٠(H $\frac{O}{8}$) + ٢٢٤٠ × S] كيلو سعر/كجرام

= ١/١٠٠ [٨٠٨٠×٧٥+٣٤٥٠٠(٥,٢ – ١٢,١/٨)+٢٢٤٠×o]كيلو سعر/كجرام

= ١/١٠٠ [٦٠٦٠٠٠ + ١٢٧٢١٩] كيلو سعر/ كجرام

أقل قيمة حرارية = (أعلى قيمة حرارية − ٠,٠٩ H × ٥٨٧) كيلوسعر/ كجرام

= (٧٣٣٢ − ٠,٠٩ × ٥,٢ × ٥٨٧) كيلو سعر/ كجرام

= ٧٠٥٧ كيلو سعر/ كجرام.

تحليل الغاز العادم (Analysis of Flue Gases)

الغاز العادم هو الغاز الناتج من حرق الوقود في الأفران والمحارق. عند تمام الحرق، يتكون الغاز العادم من CO_2، بخار الماء، نيتروجين، أكسجين زائد. مصطلح الغاز العادم مشتق من مصرف الغازات الذي يؤدي بالغازات إلى المدخنة (flue).

للحصول على الحرق الكامل للوقود، يكون من المهم وجود التصاق جيد بين الوقود مع كمية كافية من الهواء، لحرق كل المادة القابلة للاحتراق تحت الظروف المناسبة. تحليل الغازات العادمة يعطى فكرة حول عملية الحرق الكاملة أو الغير كاملة. عادة يتم قياس نسب CO_2، CO، O_2 في الغازات العادمة. أحيانا يتم كذلك تعيين N_2، H_2 والهيدروكربونات.

- إذا أظهر التحليل وجود CO، فإن هذا يبين الحرق الغير كامل للوقود أو أن هناك نقصا في الأكسجين. لذلك فإنه عندئذ يزداد الإمداد بالأكسجين.
- إذا أظهر تحليل الغاز وجود نسبة عالية من الأكسجين في الغاز العادم فإن هذا يظهر أنه بالرغم من تمام الحرق إلا أنه يوجد زيادة في الإمداد بالأكسجين. زيادة الكبيرة من الهواء تسبب الفقد في الحرارة. في مثل هذه الحالات، فإن الإمداد بالهواء إلى الوقود يتم إيقافه لمدة قصيرة أو أن يتم زيادة معدل الإمداد بالوقود.
- إذا أظهر التحليل وجود كميات كبيرة من O_2، CO_2 ، فإن هذا يبين أن الحرق غير منتظم وغير متجانس أي في بعض أجزاء من الفرن يوجد هواء زائد وفي بعض الأجزاء الأخرى يكون الإمداد بالهواء غير كافي.

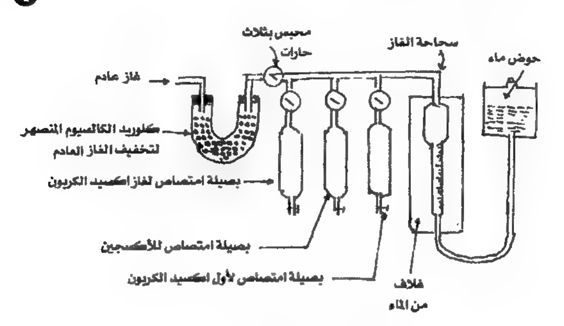
تحليل الغاز يتم باستخدام جهاز أورسات Or.sat'Apparatus

جهاز أورسات: شكل (١/٢٧)

يتكون جهاز أورسات من أنبوبة أفقية لها محبس ذو ثلاث حارات عند أحد النهايات. النهاية الأخرى من الأنبوبة الأفقية تكون متصلة بسحاحة مدرجة. السحاحة تكون محاطة بغلاف من الماء وذلك للمحافظة عليها عند درجة حرارة واحدة. النهاية السفلى للسحاحة يتم توصيلها بحوض ماء بواسطة ماسورة مطاطية طويلة. مستوى الماء في حوض الماء يمكن رفعه أو خفضه برفع أو خفض حوض الماء.

الأنبوبة الأفقية تكون متصلة على التوالي بمجموعة من ثلاث بصيلات امتصاص C, B, A. (absorbtion bulbs). كل منها خلال محبس إيقاف (stop cock). بصيلات الامتصاص بها محاليل لامتصاص CO_2, O_2, CO على التوالي.

- البصيلة (A) تحتوي على محلول (KOH) لامتصاص CO_2 (٢٥٠ جرام من KOH مذابة في ٥٠٠ سم^3 من الماء المقطر، ثم غليه لطرد أي CO_2 موجود به).
- البصيلة (B) تحتوي على محلول من حامض بيروجاليك (alkaline pyrogallic acid) لامتصاص O_2 (٢٥ جرام من حامض البيروجاليك + ٢٠٠ جرام من KOH في ٥٠٠ سم^3 من الماء المقطر).
- البصيلة (C) تحتوي على كلوريد النحاسوز النشادري (ammoniacal cuprous chloride) لامتصاص CO (١٠٠ جرام من كلوريد النحاسوز + ١٢٥ سم^3 من محلول الأمونيا + ٣٧٥ سم^3 من الماء.



شكل (١/٢٧) جهاز أورسات

العمل:

١. يتم تنظيف كل الجهاز بإتقان. يتم تشحيم المحابس واختبارها بالنسبة للإحكام ضد تسرب الهواء. بصيلات الامتصاص يتم ملئها بمحاليلها المتتالية وقفلها بواسطة محبس القفل (stop cock). يتم ملء غطاء الماء وحوض الماء بالمادة.

٢. محبس الهواء ذو الثلاث حارات يتم فتحه إلى الجو ويتم ملء السحاحة تماما بالماء وذلك برفع حوض الماء لإزالة الهواء الموجود في السحاحة.

٣. يتم الآن توصيل المحبس ذو الثلاث حارات بالغازات العادمة لتحليلها خلال (أنبوب $CaCl_2$ – U) والذي يمتص الرطوبة الموجودة في الغاز العادم. يتم خفض حوض الماء ليسمح بدخول الغاز العادم إلى السحاحة. و لكن هذا العادم يتم طرده إلى الجو بفتح المحبس ذو الثلاث حارات ورفع الحوض حيث أنه مخلوط بالهواء الموجود في الجهاز. يتم تكرار هذه العملية ٣ – ٤ مرات لتأكيد الإزالة الكاملة للهواء الموجود في الجهاز.

٤. أخيرا، يتم امتصاص الغاز في السحاحة ويتم ضبط حجم الغاز العادم إلى ١٠٠ سم^3 عند الضغط الجوي. يتم ذلك بضبط ارتفاع حوض ضبط المنسوب. يتم فتح المحبس ذو الثلاث حارات إلى الجو ورفع حوض الماء بحرص، حتى يصل منسوب الماء فيه بنفس منسوب الماء في البصيلة الذي يكون عند ١٠٠ سم^3 . يتم عندئذ قفل المحبس.

٥. الآن يتم فتح المحبس للبصيلة (A) ويتم مرور الغاز العادم خلال المحلول الموجود فيها برفع حوض الماء. CO_2 الموجود في الغاز العادم يتم امتصاصه بمحلول (KOH). يتم ثانيا إرسال الغاز إلى السحاحة وتكرار العملية عدة مرات لتأكيد تمام امتصاص CO_2 بمحلول (KOH)، وذلك برفع وخفض حوض الماء.

الغازات التي لم يتم امتصاصها أخيرا تؤخذ إلى السحاحة بواسطة رفع السائل في البصيلة (A) حتى تمتلئ تماما. بعد ذلك يتم قفل محبس البصيلة (A). يتم أخذ قراءة حجم الغاز المتبقي في السحاحة بتسوية منسوب الماء في السحاحة وفي حوض الماء. الخفض في الحجم يعطي حجم (CO_2) في ١٠٠ سم^3 من عينة الغاز العادم.

٦. الآن يتم فتح محبس البصيلة (B). يتم تكرار عملية الامتصاص كما في البصيلة (A). حجم الغاز الممتص يعطي حجم O_2 في ١٠٠ سم^3 من عينة الغاز العادم. بالمثل يتم مرور الغاز العادم خلال البصيلة (C)، لتعيين كمية (CO) الموجودة في الغاز العادم. الغاز المتبقي في السحاحة بعد الامتصاص لكل من CO, O_2, CO_2 يؤخذ كنيتروجين.

إحتياطات:

١. المحلول في البصيلة B (pyrogallic acid) يمكن كذلك أن يمتص CO بالإضافة إلى O_2 والمحلول في البصيلة C يمكن أن يمتص الغازات الثلاث CO, O_2, CO_2 . لذلك يكون من الضروري أن يتم أولا مرور الغازات العادمة خلال محلول حامض البيروجاليك السحاحة B حيث يتم فقط امتصاص O_2 (حيث CO_2 تم

امتصاصه سابقا بالمحلول في البصيلة A) وأخيرا خلال محلول كلوريد النحاسوز النشادري البصيلة C، حيث يتم امتصاص CO فقط.

٢. يتم تعيين CO بحرص حيث أن نسبته عادة صغيرة. في كل تفاعلات الحرق، توجد علاقات محددة بين أوزان الوقود المحروق، الهواء المستخدم والغازات العادمة المتكونة. حيث أن مكونات الهواء المستخدم تعتبر عادة أنها متجانسة، فإن العلاقة بين الكميات الثلاث يمكن حسابها. لذلك إذا كانت أحجام أي اثنين من الآتي تكون معلومة، فإنه يمكن حساب الثالث.

- مكونات الوقود.
- مكونات الغاز العادم.
- طبيعة الاحتراق (سواء تام أو غير تام وأي هواء زائد استخدم).

سائل رقميه مبنية على تحاليل الغاز العادم:

النقط الآتية يجب تذكرها عند حل المسائل المنية على تحليل الغاز، بالإضافة إلى النقطة السابق مناقشتها:

١. عند وجود CO في الغاز العادم، فإن كمية O_2 اللازمة لحرقه يجب استنتاجها من الأكسجين الحر، قبل حساب الهواء الزائد.

$$CO + 1/2\ O_2 \rightarrow CO_2$$

لكل جزئ من CO يلزم ½ جزئ من O_2.

فمثلا، تحليل الغاز العادم لوقود أعطى CO_2 = ١٤% ، O_2 = ٤% ، CO = ٢% ، N_2 = ٨٠% ، عندئذ إجمالي الأكسجين المستخدم يمكن حسابه من كمية N_2 في الغاز العادم أي:

٨٠ × ٢١/٧٩ = ٢٦,٥٨ جزئ (الهواء يحتوي على ٢١% أكسجين، ٧٩% نيتروجين بالحجم). الأكسجين الزائد يتم حسابه بطرح الأكسجين المطلوب لحرق CO

من كمية الأكسجين الموجودة في الغاز العادم.

الأكسجين الزائد = ٤ − (٢ × ½) = ٣ جزئ.

الهواء الزائد = $\frac{3}{(3-26.58)} \times 100 = 12.72\%$

٢. وزن الغاز العادم الجاف يتم حسابه بموازنة الكربون في الغاز العادم والكربون الموجود في الوقود.

٣. مكونات الغاز العادم عادة تعطى على أساس الجفاف وعلى أساس حجمي باستثناء النص على غير ذلك.

مثال:

احسب أدنى وزن من الهواء يلزم للحرق الكامل لكيلو جرام من الفحم له المكونات الآتية بالوزن:

C = ٩٠% ، H_2 = ٣,٥% ، O_2 = ٣% ، S = ٠,٥% ، N = ٠,٥% ،

رماد = ١,٥%

احسب نسبة المكونات بالوزن لنواتج الحرق الجاف.

الحل:

واحد كيلو جرام من الفحم يحتوي على:

C = ٠,٩ كيلوجرام ، H_2 = ٠,٠٣٥ كيلو جرام ، O_2 = ٠,٠٣ كيلو جرام ،

S = ٠,٠٠٥ كيلو جرام، N = ٠,٠٠٥ كيلو جرام

المكون	الكمية في ١ كجرام من الوقود	تفاعل الحرق بالجرام	كمية O_2 كجرام	كمية المنتج الجاف كجرام
كربون	٠,٩	$C + O_2 \rightarrow CO_2$ 12 ٣٢	١٢/٣٢ × ٠,٩ = ٢,٤	١٢/٤٤ × ٠,٠٩ = ٣,٣
هيدروجين	٠,٠٣٥	(٢) $H_2 + 1/2\ O_2 \rightarrow H_2O$ 16 ١٨	٢/١٦ × ٠,٠٣٥ = ٠,٢٨	
أكسجين	٠,٠٣	—	—	
كبريت	٠,٠٥	$S + O_2 \rightarrow SO_2$ ٣٢ ٣٢ ٦٤	١٢/٣٢ + ٠,٠٥ = ٠,٠٠٥	٣٢/٦٤ × ٠,٠٥ = ٠,٠١
نيتروجين	٠,٠٥	—	—	

الأكسجين اللازم لحرق واحد كيلو جرام من الوقود = (٢٠٤ + ٢,٨ + ٠,٠٠٥) – ٠,٠٣ = ٢,٦٥٥ كجرام

إذن الهواء المطلوب = ٢,٦٥٥ × ١٠٠/٢٣ = ١١,٥٤ كجرام

كمية المنتجات الجافة:

كمية CO_2 = ٣,٣ كجرام

كمية SO_2 = ٠,٠١ كجرام

كمية N_2 = ٧٧% من الهواء المستخدم + N_2 الموجودة في الوقود

إذن كمية المنتجات الجافة = ٣,٣ + ٠,٠١ + ٠,٠٠٥ + (١١,٥٤ × ١٠٠/٧٧)

= ٣,٣ + ٠,٠١ + ٨,٨٩١ = ١٢,٢ كجرام

نسبة المنتجات الجافة:

%CO_2 = ٣,٣/١٢,٢ × ١٠٠ = ٢٧%

% SO_2 = ٠,٠١/١٢,٢ × ١٠٠ = ٠,٠٨%

%N_2 = ٨,٨٩١/١٢,٢ × ١٠٠ = ٧٢,٩%

مثال:

عينة من الفحم تحتوي على:

C = ٦٠%، O_2 = ٦% ، N_2 = ٢% ، رماد = ٢٨%.

احسب النسبة المئوية لمكونات نواتج الحرق الجافة، بفرض استخدام هواء زائد بنسبة ٤٠%.

الحل:

المكون	الكمية الموجودة في ١ كجرام من الوقود	تفاعل الحرق	كمية O_2 (في كجرام)	كمية المنتجات الجافة
كربون	٠,٦	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	٣٢/١٢ × ٠,٦ = ١,٦	٤٤/١٢ × ٠,٦ = ٢,٢
هيدروجين	٠,٠٤	$H_2 + 1/2\ O_2 \rightarrow H_2O$	١٦/٢ × ٠,٠٤ = ٠,٢٨	
أكسجين	٠,٠٦	—	—	
N_2	٠,٠٢	—	—	—

كمية الأكسجين المطلوبة = ١,٦ + ٠,٣٢ – ٠,٠٦ = ١,٨٦ كجرام

كمية الهواء = ١,٨٦ × ١٠٠/٢٣ = ٨,٠٨٧ كجرام

كمية الهواء المستخدمة حقيقيا = ٨,٠٨٧ × ١٤٠/١٠٠ = ١١,٣٢٢ كجرام

الهواء الزائد = ١١,٣٢٢ – ٨,٠٨٧ = ٣,٢٣٥ كجرام

كمية منتجات الحرق الجافة:

كمية CO_2 = ٢,٢

كمية O_2 = الأكسجين في الهواء الحر الذي يبدو في الحالة الحرة في الغاز العادم = ٣,٢٣٥ × ١٠٠/٢٣ = ٠,٧٤٤ كجرام.

كمية N_2 = N_2 من الوقود + N_2 من الوقود المستخدم.

= ٠,٠٢ + (١١,٣٢٢ × ١٠٠/٧٧) = ٨,٧٣٨ كجرام

إجمالي وزن المنتجات الجافة = ٢,٢ + ٠,٧٤٤ + ٨,٧٣٨ كجرام

= ١١,٦٨٢ كجرام

$\%CO_2$ = (٢,٢ × ١٠٠) / ١١,٦٨٢ = ١٨,٨٣%

$\%O_2$ = (٠,٧٤٤ × ١٠٠) / ١١,٦٨٢ = ٦,٣٧

$\%N_2$ = (٨,٧٣٨ × ١٠٠) / ١١,٦٨٢ = ٧٤,٧٩

مثال:

وقود غاز له المكونات الآتية بالحجم:

H_2 = ٢٠% ، CH_4 = ٢٥% ، C_2H_6 = ١٦% ، C_2H_4 = ٩,٥% ،

Butane = ٢,٥% ، CO = ٤% ، CO_2 = ٨% ، O_2 = ٤% ، N_2 = ١٢%.

احسب الهواء المطلوب للحرق التام لواحد متر مكعب من هذا ا لغاز. إذا كان استخدام الهواء بنسبة زيادة ٥٠%، أو التحليل الحجمي لنواتج الحرق الجافة.

الحل:

المكون	الكمية في ١ م٣ من الوقود	تفاعل الحرق	حجم الأكسجين م٣	حجم المنتجات الجافة م٣
H_2	٠,٢	$H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$	٠,٢ × ٠,٥ = ٠,١ م٣	—
CH_4	٠,٢٥	$CH_4 + 2\,O_2 \rightarrow 2CO_2 + 2\,H_2O$	٠,٢٥ × ٢ = ٠,٥	CO_2 = ٠,٢٥ × ١ = ٠,٢٥
CO_2	٠,٠٨	—	—	
O_2	٠,٠٤	—	—	
N_2	٠,١٢	—	—	
C_2H_6	٠,١٦	$C_2H_6 + 3.5\,O_2 \rightarrow 2\,CO_2 + 3\,H_2O$	٠,١٦ × ٣,٥ = ٠,٥٦	CO_2 = ٠,١٦ × ٢ = ٠,٣٢
C_2H_4	٠,٠٩٥	$C_2H_4 + 3\,O_2 \rightarrow 3\,CO_2 + 2\,H_2O$	٠,٠٩٥ × ٣ = ٠,٢٨٥	CO_2 = ٠,٠٩٥ × ٢ = ٠,١٩
C_4H_8	٠,٠٢٥	$C_4H_8 + 6\,O_2 \rightarrow 4\,CO_2 + 4\,H_2O$	٠,٠٢٥ × ٦ = ٠,١٥	CO_2 = ٠,٢٥ × ٤ = ٠,١

حجم الأكسجين المطلوب = ٠,١ + ٠,٥ + ٠,٥٦ + ٠,٢٨٥ + ٠,١٥ + ٠,٢ – ٠,٠٤ = ١,٧٥٥ متر مكعب

حجم الهواء المطلوب = ١,٧٥٥ × ١٠٠/٢١ = ٨,٣٥٧ متر مكعب

الحجم الحقيقي المطلوب من الهواء = ٨,٣٥٧ × ١٥٠/١٠٠ = ١٢,٥٤ م^{٣}

الهواء الزائد = ١٢,٥٤ – ٨,٣٥٧ = ٤,١٨٣ متر مكعب

حجم منتجات الحرق الجافة:

حجـــم CO_2 محسوبا من نواتج الحرق = ٠,٢٥ + ٠,٣٢ + ٠,١ + ٠,٠٤ = ٠,٩ متر مكعب

إجمالي حجم CO_2 = ٠,٩ م^{٣} + CO_2 الموجود في الوقود = ٠,٩ + ٠,٠٨ = ٠,٩٨ م^{٣}

حجم N_2 = ٧٩% من الهواء المستخدم + N_2 في الوقود =

= (١٢,٥٤ × ٧٩/١٠٠) + ٠,١٢ = ١٠,٠٣ م^{٣}

حجم O_2 = الهواء الزائد × ٢١/١٠٠ = ٤,١٨٣ × ٢١/١٠٠ = ٠,٨٧٨ م^{٣}

إجمالي حجم النواتج الجافة = ٠,٩٨ + ١٠,٠٣ + ٠,٨٧٨ = ١١,٨٨٨ م^{٣}

CO_2% = ٠,٩٨/١١,٨٨٨ × ١٠٠ = ٨,٢٤ %

N_2% = ١٠,٠٣ / ١١,٨٨٨ × ١٠٠ = ٨٤,٣٧%

O_2% = ٠,٨٧٨/١١,٨٨٨ × ١٠٠ = ٧,٣٨%

مثال:

نسبة مكونات الفحم وجد أنها:

C = ٥٤% ، H = ٦,٥% ، O = ٣% ، N = ١,٨% ، رطـوبة = ١٧,٣% والباقي رمـــاد. عـــند حرق هذا الفحم بالهواء الزائد أعطى ٢١,٥ كجرام من الغازات العادمة الجافـــة لكـــل كيلو جرام من الفحم المحروق. احسب نسبة الهواء الزائد المستخدم في الحرق.

الحل:

المكون	الكمية لكل كجرام من الوقود	تفاعل الحرق	كمية O_2 كجرام	كمية المنتجات الجافة كجرام
H_2	٠,٠٦٥	$H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$	٠,٥٢ =١٢/١٦ × ٠,٠٦٥	—
O_2	٠,٠٣	—	—	
N_2	٠,٠١٨	—	—	
C	٠,٥٤	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	١,٤٤ = ١٢/٣٢ × ٠,٥٤	١,٩٨ = ١٢/٤٤ × ٠,٥٤

كمية الأكسجين المطلوب = ١,٤٤ + ٠,٥٢ – ٠,٣ = ١,٩٣ كجرام

كمية الهواء المطلوب = ١,٩٣ × ٢٣/١٠٠ = ٨,٣٩ كجرام

كمية المنتجات الجافة باستخدام أقل كمية من الهواء =

١,٩٨ + ٠,٠١٨ + (٨,٣٩ × ٧٧/١٠٠) = ٨,٤٥٨٣ كجرام

بفرض أن كمية الهواء الزائد = χ

إذن ٢١,٥ كجرام = ٨,٤٥٨٣ + χ كجرام

إذن χ = ٢١,٥ – ٨,٤٥٨٣ = ١٣,٠٤٢ كجرام

إذن نسبة الهواء الزائد = ١٣,٠٤٢/٨,٣٩ × ١٠٠ = ١٥٥,٤%

مثال:

فحم يحتوي على الآتي:

C = ٦٢,٤% ، H = ٤,١% ، O = ٦,٩% ، N = ١,٢% ، S = ٠,٨% ، رطوبة = ١,١٥% ، رماد = ٩,٧.

تـم حرق هذا الفحم بالطريقة حيث كان محتوى الغازات الجافة هو CO_2 = ١٢,٩% ، CO = ٠,٢% ، O_2 = ٦,١% ، N = ٨٠,٨%.

احسب الآتي:

أ- الوزن النظري للهواء اللازم لكل كيلو جرام من الفحم.

ب- الوزن الحقيقي للهواء المستخدم.

جـ- وزن الغازات العادمة الجافة المنتجة لكل كجرام من الفحم

الحل:

المكون	الكمية في كجرام من الوقود	كمية O_2 بالكيلوجرام	كمية الغازات العادمة الجافة بالكيلوجرام
H_2	٠,٠٤١	٠,٣٢٨ = ١٢/١٦ × ٠,٠٤١	—
O_2	٠,٠٦٩	—	
N_2	٠,٠١٢	—	
C	٠,٦٢٤	١,٦٦٤ = ١٢/٣٢ × ٠,٦٢٤	٢,٢٨٨ = ١٢/٤٤ × ١,٦٢٣
S	٠,٠٠٨	٠,٠٠٨ = ٢٣/٢٣ × ٠,٠٠٨	٠,٠١٦ = ٣٢/٦٤ × ٠,٠٠٨
H_2O	٠,٥١	—	—

كمية الأكسجين المطلوب = ١,٦٦٤ + ٠,٣٢٨ + ٠,٠٠٨ – ٠,٠٦٩ = ١,٩٢١ كجرام

كمية الهواء المطلوب = ٢,٠٠٣ × ٣٢/١٠٠ = ٨,٣٩٦ كجرام

الآن الأكسجين اللازم لتحويل ٠,٠٠٢ كجرام من CO الموجود في الغاز العادم إلى CO_2 = ٠,٠٠٢ × ٢٨/١٦ = ٠,٠٠١١٤ كجرام

إذن الزيادة في الأكسجين/ كجرام من الغاز العادم = كمية الأكسجين في الغاز العادم – كمية الأكسجين اللازمة لتحويل CO إلى CO_2 = ٠,٠٦١ – ٠,٠٠١١٤ = ٠,٠٥٩٨ كجرام

كمية الكربون / كجرام من الوقود:

(وزن CO_2 × ١٢/٤٤) + (وزن CO × ١٢/٢٨) = (٠,١٢٩ × ١٢/٤٤) + (٠,٠٠٢ × ١٢/٢٨) = ٠,٠٣٦٠٤ كجرام

إذن ٠,٠٣٦٠٤ كجرام من الكربون توجد في = ١ كجرام من الغاز العادم

٠,٦٢٤ كجرام من الوقود توجد في = ٠,٦٢٤/٠,٠٣٦٠٤ = ١٧,٣١٤ كجرام من

الغاز العادم

(الكربون في غاز الوقود، والكربون في الغاز العادم يجب أن يكونا متوازنان)

كمية الغاز العادم لكل ١ كيلو جرام من الفحم المحترق = ١٧,٣١٤ كجرام

وزن الأكسجين الزائد في الغاز العادم = ١٧,٣١٤ × ٠,٠٥٩ = ١,٠٣١٩ كجرام

إذن الهواء الزائد = ١,٠٣١٩ × ١٠٠/٢٣ = ٤,٤٨٩ كجرام

عندئذ وزن الهواء الحقيقي الذي تم استخدامه = [٨,٣٩٦ (النظري) + ٤,٤٨٧ (الزائد) كجرام]

= ١٢,٨٨٥ كيلو جرام.

الباب الثاني

2

الأفران

Furnaces

●● محتويات الباب :

الفصل الأول

1

الأفران

مقدمة: أنواع الأفران:

الفرن هو الجهاز الذي يتم فيه تحويل الطاقة الكيماوية للوقود أو الطاقة الكهربية إلى حرارة والتي تستخدم لرفع درجة حرارة المواد، التي تسمى الحمل أو الشحنة الموجودة في داخله لهذا الغرض. الأفران التي تعمل عند درجة حرارة منخفضة تسمى عادة (ovens) طبقا للغرض منها. يوجد كذلك أفران أخرى تستخدم في درجات الحرارة العالية لأغراض مختلفة. عند التعامل مع صناعات السيراميك فإن الأفران عندئذ تسمى (kilns). الزجاج تيم صهره في أحواض (tanks) كما تستخدم مصطلحات أخرى لهذا الغرض، مثل جهاز التلبيد (sintering) المستخدم في التهذيب (dressing) الميتاليرجي للخام.....الخ.

التقسيم:

أ- يمكن تقسيم الفرن إلى الآتي:

- نوع الدفعة الواحدة batch type
- النوع المستمر continuous type

- نوع التسخين المباشر.
- نوع التسخين غير المباشر.

ب- أنواع الأفران الميتاليرجية هي:

- فرن البوتقة crucible
- فرن المجمرة – المجمرة المكشوفة (hearth furnace)
- المحولات: بسمر، النفخ الجانبي – أو العلوي (LD)
- فرن لافع (إحماء خارجي) maffle furnace
- وعاء السقي (soaking pits)
- أفران إعادة التسخين.
- أفران التلدين (annealing)

جـ- أنواع أخرى من الأفران:

- الفرن الدوار cementkiln
- فرن الغلاية tunnelkiln
- الأفران الكهربية – ذات المجال الواحد أو الثلاثي.
  - التسخين بمقاوم معدني (resistor)
  - التسخين بالحث الكهربي (induction)

طاقة التسخين لفرن الدفعة الواحدة Batch Type

عادة يعبر عن طاقة التسخين لفرن بوزن المعدن الذي يمكن تسخينه في وحدة الزمن إلى درجة حرارة محددة عند أدنى نقطة باردة للشحنة وبدون التسخين الزائد لباقي الشحنة. نظرا لأن تكاليف الفرن تتناسب مع حجمه، فإن طاقة التسخين لوحدة الحجم تكون هامة.

يعبر عن طاقة الكثافة النوعية بأي من:

- الوزن للشحنة للتسخين / (ساعة × حجم الفرن) أو

- الوزن للشحنة للتسخين/ (ساعة × مساحة المجمرة)

تتوقف طاقة التسخين على عدة عوامل، مثل معدل انطلاق الحرارة، معدل انتقال الحرارة إلى الشحنة، معدل التوصيل لأبرد نقطة في الشحنة وغيره كثيرا.

تأثير معدل انطلاق الحرارة:

يعبر عن معدل انطلاق الحرارة بوحدات الحرارة المنطلقة في وحدة الحجم في وحدة الزمن. الوحدة هي كيلو كالوري/ المتر الكعب × الساعة. قريبا من معدل انطلاق الحرارة ومتعلق به هو التعبير طول اللهب (flame length). بالنسبة لأفران الجمرة المكشوفة وأحواض الزجاج، فإن طول اللهب يعني المسافة بين الموقد والنقطة حيث ينطفئ اللهب (أي يصبح غير متوهج". بالنسبة للأفران الصناعية، طول اللهب يعني المسافة بين الموقد والنقطة التي فيها يكون الاحتراق تام بنسبة ٩٥% في اللهب القصير. في حالة الوقود الغازي والهواء في حالة خلط الهواء قبل الموقد (الخلط المسبق)، يحدث الحرق بسرعة أعلى، ويلزم حجم احتراق أقل مقارنة بالخلط داخل الفرن وفي حالة التسخين المسبق لهواء الحرق فإن الحرق يتقدم بسرعة أكبر.

بالإضافة إلى كمية الحرارة المنطلقة في وحدة الحجم ووحدة الزمن فإن درجة الحرارة التي تنطلق عندها تؤثر على طاقة الفرن. كل جزئ من عناصر الحرق عند درجة حرارة اللهب النظرية وتنتقل حرارة التفاعل نحو الأغراض المحيطة (غازية، سائلة وصلبة) مع استمرار الحرق. يمكن الوصول إلى درجة حرارة اللهب النظرية فقط في حالة الحرق السريع اللانهائي أو بالحرق في غرفة محكمة الغلق ضد الحرارة وهذه لا تكون مرتفعة بالنسبة للوقود الضعيف.

في حالة الوقود الضعيف يمكن زيادة درجة الحرارة فقط بالتسخين المسبق للهواء أو الوقود أو كليهما. زيادة الأكسجين في الهواء كذلك تزيد من درجة حرارة اللهب.

تأثير معدل امتصاص الحرارة بواسطة الشحنة:

يلاحظ أنه في الأفران الصناعية عندما يمكن إطلاق كمية الحرارة المناسبة عند درجة حرارة مرتفعة، فإن طاقة الفرن تتوقف على معدل الانتقال الحراري إلى الشحنة والذي يعتمد على العوامل التالية:

- درجة حرارة حوائط الفرن عند إدخال الشحنة الباردة.
- درجة الحرارة المطلوب تسخين الشحنة إليها.
- درجة حرارة نواتج الحريق.
- إنبعاثية (emissivity) نواتج الحريق.
- إنبعاثية الحوائط.
- إنبعاثية تسخين الشحنة.
- النسبة بين مساحة الشحنة إلى مساحة الحائط.
- سمك طبقة نواتج الحريق.
- التوصيل الحراي للشحنة (بما فيها الفراغات).
- تجانس درجة الحرارة المطلوبة في المنتج.
- سمك شحنة التسخين.
- حجم الفرن (مساحة المجمرة والحجم).
- سرعة الغازات في الفرن.

عموما انتقال الحرارة إلى الشحنة يحدد طاقة التسخين لشحنة التسخين الدقيقة، بينما تساوي درجة الحرارة خلال الشحنة يحدد طاقة التسخين للشحنة السميكة ذات التوصيل الحراري المنخفض.

تأثير تنظيم الشحنة:

تنظيم الشحنة وسمكها له تأثير واضح عند تسخين القطع. يجب توفير الفراغ بين القطع لملقاط المناولة. في حالة عدم وجود فراغ (فواصل) كبيرة بين القطع، فإن طاقة التسخين لا تتأثر بدرجة جيدة، ذلك لأن النقط الغازية للمجمرة تتقبل الإشعاع من

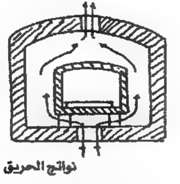
القواعد وكذلك من السقف والحوائط الجانبية. الإشعاع من المجمرة (والتي ليست ساخنة مثل السقف) تزيد انتقال الحرارة إلى الأسطح الرأسية.

تأثير سمك الشحنة:

إذا كان حجم الجسم صغير مقارنة بالانتقال الحراري لسطحه، فإن الجسم يمكن تسخينه بسرعة ولكن مع اختلاف صغير في درجة الحرارة ما بين السطح والجوف (core). عند تسخين الصلب للدرفلة (rolling) أو للطرق (forging). فإن التطبيق العملي ينتبه قليلا نحو حقيقة أ، زمن. الإنضاج الحراري (soaking time) يجب أن يزداد بسرعة أكبر عن القطر أو سمك الشحنة شريطة أن القطر لا يزيد عن ٣٠ سم وأن الحرارة تستقبل بانتظام من كل الأجناب. عند تسخين مقاطع كبيرة من الصلب المطاوع، فإن الإمداد الحراري يكون عاليا في المراحل الأولى ويقل عندما يصل سطح الشحنة إلى درجة الحرارة النهائية المطلوبة.

الفرن اللافح أو فرن الإحماء الخارجي: (Muffle Furnace)

الغرض الرئيسي للإحماء الخارجي هو لحماية الشحنة من تأثير نواتج الحريق. الغرض الآخر هو لتسوية الحرارة الموجودة في جانب الحرق مع حائط اللفح. طاقة التسخين للفح المحيط بالشحنة تتوقف على السطح والقدرة الإنبعاثية للشحنة وعلى خواص حائط اللفح (درجة الحرارة، المساحة، الإنبعاثية). بالنسبة لمجموعة العوامل لهذه المتغيرات فإن طاقة التسخين أقل قليلا عن تلك لفرن اللهب المباشر (ذو نفس درجة حرارة الحائط) بسبب عدم وجود نواتج الحريق التي تكون أكثر سخونة عن حائط الفرن شكل (٢/١).



شكل (٢/١) فرن لافح

الفرق الكبير في درجة الحرارة على كل جانب لحائط اللفح المصنوع من الطفل الحراري لا يقلل فقط طاقة التسخين للفح وكذلك يسبب كذلك أن تخرج نواتج الحريق عند درجة حرارة عالية جدا. بسبب هذين السببين فإن حوائط اللفح تعمل رقيقة بدرجة عملية وبمواد لها كلا من التوصيل الحراري والتحمل ضد درجة الحرارة العالية. من بين أكثر المواد مناسبة للاستخدام في حوائط اللفح هو كلا من الصلب السبيكة، كربيد السيليكون. لا تستخدم الأفران اللافحة لتسخين المعادن لأكثر من ١٠٠٠ °م بسبب تكاليف الصيانة. أفران لفح مشابهة تستخدم كأفران معملية والتي يتم تسخينها كهربيا.

الأفران ذات درجة الحرارة المنخفضة:

(Low Temp Furnaces and Ovens)

في حالة الأفران ذات درجة الحرارة المنخفضة فإن الانتقال الحراري بالإشعاع يكون أقل نسبيا عن الأفران ذات درجة الحرارة لمرتفعة. عند درجة حرارة ١٢٣٠ °م فإن وحدة المساحة تشع ١٦ ضعف تلك الحرارة التي يتم إشعاعها عند درجة حرارة ٤٧٦ °م. معدل الانتقال الحراري بالحمل الحراري في الاتجاه الرأسي (convection) يزداد بزيادة مع زيادة الكثافة وزيادة السرعة للمجال المتدفق. تزداد سرعة المجال المتدفق إما بالفعل النفاث (jet action) للهواء الزائد أو في معظم الحالات بالمراوح الساخنة. يتم وضع حد للسرعة بالمواءمة ما بين التجانس على

جانب مع تكاليف الطاقة وحالة الشحنة على الجانب الآخر، الإنبعاثية تكون أحد العوامل. زيادة لمعان الشحنة، يعني أعلى سرعة قصوى. الطاقة للمروحة تتحول إلى حرارة. انتقال الحرارة بالحمل الرأسي يتحدد طبقا لمعامل الانتقال الحراري (قيمة المعامل يجب تأكيدها). بعد معرفة المعامل، يمكن حساب زمن التسخين في المكان حيث الالتصاق الأول للغازات الساخنة مع الشحنة.

طاقة التسخين للأفران المستمرة (Meating Capacity of Coninous Fur)

في الأفران المستمرة تتحرك الشحنة باستمرار وبطريقة متقطعة خلالها. يمكن دفع الشحنة أو دحرجتها أو قد توضع على مجمرة دوارة أو أن تعلق على ناقل علوي. الفرن المستمر يمكن تسخينه بحيث أن تكون درجة الحرارة لنواتج الحرق ثابتة عمليا في أي مكان في الفرن.

طاقة التسخين للأفران المستمرة يمكن أن تزيد عن تلك للأفران ذات الدفعات (batch type) والتي لها نفس مساحة المجمرة لأن درجة الحرارة يجب خفضها في أفران الدفعات لمنع حدوث التسخين الزائد. في الفرن المستمر درجة الحرارة يمكن أن تكون مرتفعة جدا إذا أزيلت الشحنة الرقيقة بسرعة. وفي حالة الشحنة السميكة فإنه توجد منطقة إحماء كافية للحصول على تساوي درجة الحرارة في كل المقاطع.

أفران اللهب الأمامي المستمر (Front Fired Continous Furnaces)

طاقة التسخين لهذه الأفران تتحدد طبقا لمتوسط فرق درجة الحرارة بين نواتج الحرق والشحنة وهي أقل في الأفران حيث تكون درجة الحرارة منتظمة. الحرق الأمامي له عيوب في أن معدل الانتقال الحراري يكون عند أعلاه في المكان حيث تكون درجة حرارة سطح الشحنة عند أعلاه.

اللهب الأمامي من القمة والقاع (Front Firing Top and Bottom)

الطاقة الحرارية للأفران وحرارة القاع هي أقل من ضعف ذلك في الحالة السابقة، لأن منطقة الإحماء يجب إعدادها لإبعاد النقط السوداء التي كانت بسبب ريش

مواسير مياه التبريد. أقصى معدل هو حوالي ٤٦٠ كجرام/ سم٢ × الساعة مع درجة حرارة الفرن ١٢٩٠ °م ونسبيا أقل للشحنة الثقيلة جدا. هذه القيم يمكن أن تزداد بتغيير مواقد اللهب القصير واللهب الطويل. الأخير يمكن زيادته بدرجة الحرارة العالية للفرن.

اللهب الجانبي (Side Firing)

طاقة التسخين للأفران المستمرة تزداد عموما بإضافة لهب في المسافة المتوسطة أو لهب جانبي إلى نهاية اللهب. بهذه الطريقة يمكن زيادة الطاقة بحوالي ٥٠%. أفران تسخين الألواح ذات معدلات ٧٣٠ كجرام/ المتر المربع × الساعة للصلب منخفض الكربون. طاقة التسخين للأفران المستمرة تتغير كثيرا مع طبيعة وحالة شحنة التسخين. الصلب عالي الكربون لا يتم تسخينه لدرجة حرارة عالية كما هو بالنسبة للصلب منخفض الكربون وذلك لتجنب إزالة الكربون. حيث النتيجة أن طاقة التسخين تنخفض.

حدود طول المجمرة بدفع الشحنة:

العامل الآخر الذي يحد من طاقة الأفران المستمرة من نوع الدفع بالنسبة لكمية التسخين في وحدة الزمن ولكن ليس بنسبة التسخين لوحدة المساحة في وحدة الزمن. والعامل هو المعروف بالطول الآمن للمجمرة (safe length of hearth) . الطول الآمن يتوقف على استواء المجمرة، سمك الشحنة، وشكل الأسطح الملتصقة للشحنة.

الاقتصاديات أو كفاءة عند الاستخدام بالشكل الواقعي بالنسبة للأفران الصناعية، هو دليل لتكاليف التسخين لوحدة الوزن للمنتج النهائي. تكاليف التسخين تشمل ليس فقط تكاليف الوقود ولكن كذلك تكاليف إشعال الفرن، تكاليف الصيانة والإصلاح، وتكاليف إيجاد مجال للحماية وتكاليف الأجزاء التالفة أو المحروقة. ويشمل كذلك تكاليف التشغيل الميكانيكي لهذه القطع والتي عند التفتيش يكون بها العيوب الناتجة عن التسخين الغير مناسب.

مع كثير من البنود التي تدخل في تكاليف التسخين، يكون من الممكن في بعض الحالات أن يكون الوقود الأعلى سعرا هو الأوفر اقتصاديا. بينما تتراوح كفاءة أفران الغلايات ما بين ٦٠ – ٩٠% أو أكثر قليلا فإن كفاءة الأفران في الاستخدامات الميتاليرجية قد تنخفض أحيانا إلى حوالي ١٠% في نوع الاحتراق، ولكنها تكون أعلى قليلا في النوع الكهربي. مع الظروف المناسبة ومع التصميم الجيد والتشغيل الجيد فإن كفاءة الفرن حتى ٦٠% أو أعلى من ذلك يمكن تحقيقها ولكن مثل هذه القيم المرتفعة تعتبر استثناءا وليس قاعدة.

الكفاءة تعني بها كفاءة الوقود والتي هي النسبة بين الحرارة الداخلة إلى الشحنة إلى الحرارة الكلية للوقود .أحد الأسباب لاختلاف الكفاءة بين الغلايات والأفران الصناعية هو في درجة الحرارة النهائية للمادة التي يتم تسخينها. الغازات يمكن أن تعطي حرارة للشحنة طالما أنها أسخن من الشحنة. وبالتالي، فإن الغازات العادمة تترك الفرن الصناعي عند درجة حرارة عالية جدا. وهذا العامل هو المسئول عن انخفاض كفاءة الفرن.

الوقود اللازم للحرق يتم حرقه في منطقة الحرق للفرن. إنه يكون المطلوب أن معظم الحرارة الناتجة تنقل إلى الشحنة ولكن الحرارة تذهب في مكان آخر. بعض منها يمر إلى حائط الفرن والمجمرة، والبعض الآخر يفقد في الوسط المحيط بالإشعاع والتصعيد الحراري من الأسطح الخارجية للحوائط أو بالتوصيل نحو الأرض. كذلك تشع الحرارة خلال الشقوق أو الفتحات الأخرى وتمر غازات الفرن إلى الخارج حول الباب، وأحيانا تحرق في الفتحة حاملة الحرارة إلى الخارج. كذلك تفقد الحرارة في كل وقت يكون الباب فيه مفتوحا. شكل آخر من فقد ا لحرارة هو من خلال الشحنة. أخيرا معظم الفقد في الحرارة يمر إلى الخارج مع نواتج الحرق، إما في شكل حرارة محسوسة أو كعدم إتمام الاحتراق. تتطلب اقتصاديات الوقود أن يكون الجزء الأكبر من الحرارة الذي يمر بالشحنة يكون أكبر ما يمكن وأن تكون كل الحرارة المفقودة أقل ما يمكن.

العوامل المؤثرة على اقتصاديات الوقود في الفرن:

العوامل المختلفة المؤثرة على اقتصاديات الوقود في الأفران الصناعية هي كالآتي:

- الاحتراق الكامل مع أدنى هواء زائد.
- التوزيع الجيد للحرارة.
- العمل عند درجة الحرارة المطلوبة.
- خفض الفقد في الحرارة من فتحات الفرن.
- خفض فقد الحوائط.
- السيطرة على تيار السحب.
- استغلال أقصى طاقة.
- استعادة الحرارة المفقودة من غازات الفرن العادمة.

الحرق الكامل مع أدنى هواء زائد:

للحصول على الحرق الكامل للوقود مع أدنى هواء زائد فإنه يلزم مراعاة عدد من العوامل (مثل الاختيار المناسب والصيانة للتحكم، رصد الهواء الزائد، ضغط تغلغل هواء الحرق). قيمة فقد الحرارة مع مختلف كميات الهواء في حالة حمل غازات الفرن العادمة بعيدا عن ٩٠٠ °م موضحة في الجدول التالي.

نسبة الهواء الزائد	نسبة إجمالي الحرارة التي تحملها الغازات العادمة بعيدا (درجة حرارة الغازات العادمة ٩٠٠ °م)
٢٥	٤٨
٥٠	٥٥
٧٥	٦٣
١٠٠٠	٧١

بالإضافة إلى الزيادة الغير عادية في الفقد الحراري مع زيادة الهواء الزائد، فإن دخول هواء زائد بكمية كبيرة يخفض من درجة حرارة اللهب وبالتالي يقلل درجة

حرارة الفرن ومعدل التسخين. في حالة استخدام زيادة صغيرة جدا من الهواء، فإن الاحتراق سوف لا يكون تاما وغازات المدخنة سوف تحمل وقود غير محترق في شكل غازات غير محترقة مثل أو أكسيد الكربون، الهيدروجين والهيدروكربونات الغير محترقة والتي كان يمكن أن تحرق في غرفة الاحتراق.

التوزيع الجيد للحرارة:

من الناحية المثالية فإن الفرن يجب أن يصمم بحيث أن يتم في وقت معين تسخين حجم معين من المادة إلى درجة حرارة متجانسة مع أدنى معدل لحرق الوقود. لتحقيق ذلك يجب مراعاة النقط التالية:

- يجب ألا يمس اللهب الشحنة وأن ينتشر بحرية لأي غرض صلب. أن إعادته مهما تكن تحقيق ترزيز حبيبات الوقود بما يؤثر على الحريق وإيجاد دخان أسود. في حالة التصاق اللهب بالشحنة سيزداد الفقد للقشور (scale losses) عدة مرات.
- الحراريات يتم استخلاص الأملاح منها (leached) في حالة التصاق اللهب لأي جزء من الفرن، لأن نواتج الاحتراق الغير كامل يمكن أن تتفاعل مع بعض مكونات الحراريات عند درجة حرارة اللهب العالية.
- اللهب من مختلف المواقد في فراغ الحرق يجب كذلك أن يظل صافيا (وبعيدا) عن بعضه البعض. في حالة تقاطع اللهب من مختلف المواقد سيحدث احتراق غير كفء. يمكن التحكم في هذا بوضع مواقد الحرق في الحوائط المتعاكسة بطريقة تبادلية (staggering).
- اللهب لديه استعداد للتحرك بحرية في فراغ الحرق فوق المادة مباشرة في أفران إعادة التسخين الصغيرة، لا يتم وضع محور الموقد موازي للمجمرة ولكن دائما بزاوية علوية. تؤخذ جميع الاحتياطات لتجنب حدوث تصادم للهب مع السقف.

المواقد الكبيرة تنتج لهب طويل والذي قد يصعب احتواءه خلال حوائط الفرن. زيادة المواقد ذات طاقة أقل توفر توزيع أفضل للحرارة في الفرن. وكذلك تقلل من فقد القشور وتزيد من عمر الخدمة للفرن.

- في حالة أفران إعادة التسخين الصغيرة يتضح استمرار اللهب الطويل باللون الذهبي الأصفر عند حرق زيت الفرن لتجانس التسخين. يجب ملاحظة أن اللهب يجب ألا يكون طويلا جدا ليمكنه دخول المدخنة أو الخروج من الأبواب أو من أعلا. يحدث هذا عند حرق وقود زائد لزيادة معدل الإنتاج.

الجزء الكبير للوقود الإضافي المحروق يخرج من المدخنة كحرارة مفقودة. لذلك ينصح باحتواء اللهب خلال الفرن.

- يفضل كذلك توفير حجم الحريق المناسب لمعدل انطلاق الحرارة. كقاعدة عامة، في حالة أفران التسخين باللهب المباشر، فإن انطلاق الحرارة الذي يعادل ٧٠٠ – ٩٠٠ كيلو كالوري/ الساعة في المتر المكعب من حجم الاحتراق يمكن استخدامه.

العمل عند درجة الحرارة المطلوبة:

بالنسبة لأي عملية تسخين أو صهر صناعية، توجد أقصى درجة حرارة لتشغيل الفرن.

التشغيل عند درجة حرارة مرتفعة جدا، لا يعني فقط فقد في الوقود في شكل حرارة، ولكن يسبب كذلك التسخين الزائد للشحنة، وإفسادها أو الأكسدة الزائدة وإزالة الكربون هذا بالإضافة إلى الإجهاد الزائد على الحراريات. يمكن تشغيل الفرن بدون أي تحكم في درجة الحرارة، ذلك بواسطة الفتح والقفل والذي يكون بالغ الضرر بالنسبة لتحقيق الكفاءة العالية للفرن. في حالة القفل (off) يدخل فقط الهواء إلى الفرن بما يعمل على خفض درجة حرارته سريعا، حيث عند إعادة تشغيل حرق الوقود فإن كمية الوقود اللازمة لرفع درجة الحرارة تكون أكثر كثيرا من الضرورية عند تشغيل الفرن بالتحكم النسبي.

خفض الفقد الحراري من فتحات الفرن:

في أفران حرق الوقود يوجد فقد كبير في الحرارة خلال فتحات الفرن. فلكل فتحة كبيرة يمكن حساب الفقد في الحرارة بتقدير إشعاعات الأجسام عند درجة حرارة الفرن وضرب هذه القيمة مع الإنبعاثية (emmissivity) (والتي عادة ٠,٨ لأفران الطوب)، ومعامل الإشعاع خلال الفتحات. يجب قفل جميع الفتحات الغير ضرورية في الفرن مع احتواء اللهب خلال الفرن. الأبواب يجب أن تكون مقفلة بإحكام ومصنوعة من مادة خفيفة لها قدرة تحمل ومقاومة للحرارة. الأبواب بالمفصلات أو المتأرجحة يمكن استخدامها. لخفض الفقد في الحرارة، فإن التبطين الحراري يجب أن يكون سميك بما فيه الكفاية وله خاصية عزل جيدة.

لخفض الإجهاد وكذلك لتأكيد سهولة قفل الفتحات، يمكن استخدام أبواب للرفع العمودية التي يتم اتزانها بثقل مقابل (counter weight).

خفض فقد الحوائط:

حوالي من ٣٠ – ٤٠% من الوقود المستخدم في الفرن عموما يكون في شكل حرارة مفقود في الأفران المستمرة أو المتقطعة. الاختيار المناسب للحراريات ومواد العزل الحراري يحقق وفر كبير في وقود الأفران الصناعية.

مواد متعددة ذات خصائص العزل الحراري والاستمرارية يجب أخذها في الاعتبار لخفض الفقد الحراري خلال حوائط الفرن. استخدام الحراريات العازلة ذات النوعية المناسبة والسمك المناسب يمكن أن يقلل من طاقة التخزين الحراري للحوائط، وكذلك الوقت اللازم لوصول الفرن إلى درجة حرارة التشغيل بنسبة تصل إلى ٦٠ – ٧٠% في الأفران التي تعمل بطريقة متقطعة (Initermittent).

مواد العزل يعود الانخفاض في التوصيل الحراري لها للمسام، بينما المقاومة الحرارية تعتمد على الوزن لوحدة الحجم للمادة الصلبة وكذلك حرارتها النوعية. يوجد ثلاث أنواع من طوب العزل:

- منتجات من (diatomaceous earth) التراب الدياتومي.
- منتجات من الديدان vermiculite
- حراريات (الطفل الحراري أو السيليكا) ومنتجاتها تعرف بحراريات العزل وتستخدم في التبطين الداخلي في الفرن.

توجد طريقتين للعزل تستخدم للأفران ذات درجة الحرارة العالية. عند عمل الفرن باستمرار تحت ظروف شاقة من الجو أو من درجة الحرارة، فإنه يتم وضع تكسية من عزل التراب الدياتومي خلف قاعدة الحراري الكثيف. في عوازل أخرى حيث الظروف أقل حدة ودرجة الحرارة أقل، وخاصة في الأفران المتقطعة ذات الدورة القصيرة، فإن مادة العزل نفسها يمكن أن تكون التبطين الحراري بدون أي ظهير من الطوب الحراري. المواد من النوع الأخير تكون من الحراريات ذات المسامية العالية ولها قوة جيدة ومقاومة التشظي، ويمكن عموما استخدامها في المجال حتى ١٨٠٠ °م. نوع آخر من المواد (شعيرات السيراميك) ذات التوصيل المنخفض جدا، ووزن خفيف جدا، ذات القدرة على تحمل الصدمات الحرارية يمكن استخدامها كذلك في الأفران المتقطعة.

التحكم في سحب تيار الهواء للفرن: (Control of Furnace Draught)

في أي فرن، دخول الهواء بدون سيطرة وتحكم يجب منعه. وهو يؤدي إلى استمرار ضغط زائد قليلا داخل الأفران لتجنب تغلغل الهواء. الأفران الضخمة، وخاصة تلك ذات مدخنة السحب تكون مجهزة بتجهيزات الإحساس بالضغط وقراءته والتي إما أن توقف أو تغذي غاز الحماية للفرن.

عند درجة حرارة الفرن، الأكسجين يحدث التآكل العادية مكونا الأكاسيد أو القشور. أول أكسيد الكربون والهيدروجين يختزل الأكاسيد المعدن. الجو المساعد على الاختزال (زيادة الوقود) يكون أكاسيد أقل من تلك التي تتكون بفعل الجو المؤكسد (زيادة الهواء) ولكن القشور (الأكاسيد) تكون ملتصقة جيدا. في الجو المؤكسد تتكون القشور بكمية أكبر ولكن يكون من السهل إزالتها.

في حالة وجود ضغط سالب في الفرن فإنه يحدث ارتشاح هوائي خلال الشقوق والفتحات بما يؤثر على التحكم في نسبة الهواء إلى الوقود. إهمال ضغط الفرن يمكن أن يعني مشاكل المعدن البارد وعدم تجانس درجة حرارة المعدن والذي يمكن أن يؤثر فيما بعد على العمليات مثل الطرق، الدرفلة والذي يترتب عليه زيادة في استهلاك الطاقة.

ضغط الفرن يكون ثابتا في مختلف أجزاء الفرن. مستوى الصفر في الفرن هو المستوى الذي يكون عنده ضغط الفرن مساويا للضغط الجوي. لقد لوحظ أن أدنى استهلاك للوقود يحدث عند ضغط عالي للفرن، أكثر من ذلك اللازم للمحافظة على مستوى الصفر عند المجمرة. ترجع هذه الظاهرة إلى سابق الترشيح (exfiteration) . وسابق الترشيح أقل خطورة من الرشح. بعض المشاكل المتعلقة بسابق الترشيح تكون خارج اللهب، التسخين الزائد لحراريات الفرن يؤدي إلى خفض عمر الطوب، زيادة الصيانة للفرن، احتراق مسارات الهواء والمعدات الملتصقة بالفرن....الخ.

استغلال أقصى طاقة

عند التصميم الأولي للفرن يكون الهدف هو الحصول على الفرن الصحيح للمهمة المطلوبة أي سواء كان الفرن من النوع المستمر أو من النوع المرحلي. في حالة التغذية المستمرة للشحنة عند أحد النهايات والسحب من الطرف الآخر عندئذ ستزداد الكفاءة الكلية مع استرجاع الشحنة من منتجات الغاز العادم. في حالة عدم إمكان استخدام فرن مستمر، عندئذ يكون من المهم التخطيط بحرص لسحب الأحمال من أفران الدفعة الواحدة. يتم تفريغ الفرن فورا ما أمكن (خلال الحدود الميتاليرجية والحدود الأخرى) لإمكان استخدام الحرارة المتبقية في الفرن.

تحميل الفرن: (Furnace Loading)

أحد العوامل الهامة ذات التأثير على الكفاءة هي تحميل الفرن. يوجد تحميل معين الذي عنده يعمل الفرن عند أقصى طاقة حرارية. في حالة التحميل الغير تام

للفرن، فإنه سيتم استغلال جزء بسيط من الحرارة المتاحة في غرفة العمل بواسطة الحمل وبذلك ستنخفض الكفاءة.

أقصى تحميل يتم الحصول عليه بالمحاولات، مع ملاحظة أن وزن المادة في كل شحنة، الوقت اللازم للوصول إلى درجة حرارة معينة وكمية الوقود المستخدم.

يجب الحرص نحو تحميل الفرن بالمعدل المقابل لأقصى كفاءة، ذلك رغم حقيقة أن هذه المحددات نحو تحقيق ذلك قد يتعارض أحيانا ببعض العوامل بخلاف التحكم في العمل.

استهلاك "عدم التحميل" لاستمرار فرن المرحلة الواحدة البسيط عند ١٣٠٠ °م عندما يكون فارغا هو حوالي ٧٠% لذلك اللازم للعمل عند أقصى معدل تحميل.

تنسيق الحمل على مجمرة الفرن يجب تنظيمه بحيث:

- أن يستقبل أقصى إشعاع من الأسطح الساخنة لغرفة التسخين والأفران.
- الغازات الساخنة يتم تدويرها بكفاءة حول الأسطح المستقبلة للحرارة.
- يجب أن يكون هناك فواصل بين الشحنات. تطابق المواد ينتج عنه عدم تجانس الحرارة ويجب تجنبه.

يجب عدم وضع الشحنة في الأماكن التالية:

- في الممر المباشر للمواقد أو حيث احتمال حدوث تصادم مع اللهب.
- في المناطق حيث التي من المحتمل أن تسبب انسداد أو إعاقة لنظام تيار الغاز العادم للفرن.
- قريبا من فتحات الأبواب حيث يحتمل حدوث نقاط باردة.

لاقتصاديات الوقود ونوعية الشغل يجب أن تظل المواد المتضمنة للحمل في الفرن أدنى وقت محدد للحصول على المتطلبات الطبيعية والميتاليرجية.

عند وصول المادة لهذه الصفات فإنه يجب سحبها من الفرن لتجنب التلف وفقد في الوقود. في حالة تسخين الصلب، القاعدة العامة هي أن الحرارة تسري ٣ مليمتر في

خمسة دقائق. في حالة القضبان الأسطوانية، المربعة معدل التسخين المحدد مسبقا هو ٢٠ دقيقة لكل ٢٥ مليمتر من قطر الصلب المطاوع، ٤٠ دقيقة لكل ٢٥ مليمتر لصلب السبيكة. ولتلوين الصلب (annealing) يلزم ٦٠ دقيقة لكل ٢٥ مليمتر من القطر أو السمك. القيم السابقة تنطبق على الأفران حيث حجم الشحنة يكون صغيرا نسبيا بالنسبة لحجم الفرن.

يجب تشغيل الفرن عند أقصى طاقة للحصول على أفضل اقتصاديات للوقود وذلك باختيار الحجم المناسب والنوع المناسب للفرن ونظام تداول المواد. التوقف من آن إلى آخر في ماكينات الإنتاج يجعل الفرن عاطلا لفترة زمنية طويلة، وبذا يسبب استهلاك زائد في الوقود. يمكن تحقيق الاقتصاد بجمع الشحنات المتتالية المناسبة مع التشغيل المستمر للفرن عند أقصى تحميل اقتصادي ثم الإيقاف التام كلية لفترة زمنية في حالة عدم توفر الشغل الكافي. عند التوقف يجب التخلص من كل مصادر تسرب الهواء.

استعادة الحرارة من الغازات العادمة:

في أي فرن صناعي تترك نواتج الاحتراق الفرن عند درجة حرارة أعلى من درجة حرارة الشحنة. الفقد الحراري المحسوس في الغازات العادمة، عند ترك المدخنة، تحمل من ٣٥ – ٥٥% من دخل الحرارة للفرن. كلما زادت كمية الهواء الزائد ودرجة حرارة الغاز العادم، كلما زاد احتمال الفقد في الحرارة.

يمكن استعادة الحرارة الملموسة في الغازات بواسطة:

- التسخين المسبق للشحنة.
- التسخين المسبق لهواء الحرق.

هذا بجانب أنه توجد تقنيات لاستعادة الحرارة المفقودة قبل توليد البخار من خلال غلايات الحرارة المفقودة، نظم تربينة الغاز، امتصاص البخار، نظم التبريد....الخ

الاستعادة المباشرة للطاقة من الغازات العادمة يمكن تحقيقها في الأفران

الميتاليرجية بالتسخين المسبق للمواد الداخلة. يتوقف تأثير التسخين المسبق للشحنة على الأبعاد والخواص الطبيعية للمادة المطلوب تسخينها بجانب طرق التداول المستخدمة.

الفرن المستمر من نوع الدفع يمكن تشغيله باستخدام الحرارة المفقودة وذلك بالتسخين المسبق للشحنة. في حالة بطء معدل التسخين، فإن معظم الحرارة التي تكتسبها الشحنة تكون عند الطرف الساخن، ونواتج الحريق يمكن أن تقوم بالتسخين المسبق للكتل المعدنية بطيئة التحرك. يعمل الاستفادة من فقد الوقود بدرجة كبيرة بالتسخين المسبق لهواء الحرق، بالمسترجع والمولد.

فوائد هواء الاحتراق الساخن هي:

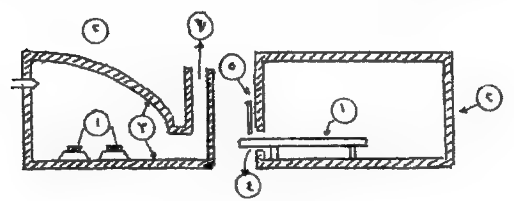
- الوفر في استهلاك الوقود.
- زيادة درجة حرارة اللهب.
- تحسين الاحتراق.
- خفض معدل التسخين الأولي.
- الخفض في فقد القشور.

في المسترجع يحدث التبادل الحراري ما بين الغازات العادمة والهواء خلال الحوائط المعدنية أو من السيراميك. على الجانب الآخر في المولد، يمر كلا من الغازات العادمة والهواء المطلوب تسخينه مسبقا بالتبادل خلال مجال تخزين الطاقة، بما ينتج عنه الانتقال الحراري.

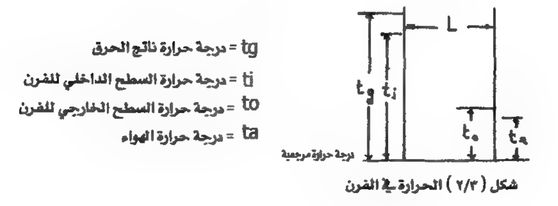
توزيع الحرارة في الفرن: شكل (٢/٢) ، شكل (٢/٣)

معظم الحرارة تنطلق في منطقة الاحتراق عند اليسار وتتحرك من هناك نحو اليمين. الحرارة المتولدة بهذا يتم امتصاصها (١) بواسطة الشحنة و الذي هو المطلوب. ولكن الحرارة تذهب كذلك إلى أماكن أخرى حيث بعضها يذهب إلى حوائط الفرن وبعضها إلى المجمرة (٣) بما يزيد حرارة هذه الأجزاء. جزء آخر من الحرارة

يفقد بالإشعاع والحمل الحراري من الأسطح الخارجية للحوائط أو بالحمل الحراري نحو الأرض (٢). تشع الحرارة بعيدا خلال الشقوق أو الفتحات الأخرى (٤). وتمر غازات الفرن إلى الخارج حول الباب. (٥) أحيانا الحرق المكشوف مع حمل الحرارة. تفقد الحرارة في كل وقت يكون فيه الباب مفتوحا. تفقد الحرارة من الأجزاء الطويلة المعدنية والتي يكون جزء منها خارج الفرن (٦). أخيرا الفقد الحراري إلى الخارج مع منتجات الحريق و (٧) إما في شكل حرارة ملموسة أو كحرارة مختزنة بسبب عدم الاحتراق الكامل.



شكل (٢/٢) توزيع الحرارة في الفرن



شكل (٢/٣) الحرارة في الفرن

الحرارة المفقودة من حوائط الفرن أو فقد الحائط:

الحرارة المفقودة من خارج حوائط الفرن هي أحد الظواهر الهامة ذات التأثير على اقتصاديات الأفران. الفقد من الحوائط أثناء التشغيل المستمر والغير متقطع يختلف عن الفقد لنفس الفرن في حالة تشغيله بطريقة متقطعة.

الفقد الحراري من الحائط أثناء التشغيل المنتظم:

للسريان المنتظم للحرارة خلال الحائط، تستخدم الحالات كما في الشكل(٢/٨). درجة حرارة نواتج الحريق تزيد عن درجة حرارة سطح الحائط. الفقد الحراري للحوائط من الطفل الحراري المدموك أقل من الفقد الحراري بالطوب الحراري الكثيف لأن التوصيل الحراري للطفل اللدن يكون بعد الجفاف والحرق في الموقع حوالي٦٠% من التوصيل للطوب الحراري الكثيف. تسرب الغاز يزيد من فقد الحائط ولكن يكون من الخطأ إضافة فقد الحائط بالتوصيل لأن التسرب يزيد درجة حرارة الوجه البارد للحائط وبذا يقلل من تسرب الحرارة بالتوصيل. فقد الحرارة بالتوصيل (conduction) وبالتسرب (leakage) يمكن خفضها بإحاطة الفرن بغلاف من الصلب. الفقد في وحدة المساحة يكون أكبر كثيرا قرب الأطراف عنه قرب المركز .

الفقد من الحائط أثناء التشغيل المتقطع:

في التطبيقات العملية حيث زمن التشغيل يتغير بدون انتظام مع زمن التوقف. أثناء فترة التوقف، فإن الحرارة المختزنة في الحراريات أثناء فترة التشغيل يتم فقدها بالتدريج أساسا بالإشعاع والحمل الحراري (convection) من السطح البارد. بالإضافة إلى أن بعض الحرارة يفقد بواسطة تدفق الهواء خلال الفرن. تشتت الحرارة المختزنة هو خسارة، لأن الحرارة المفقودة هي على الأقل تنقل جزئيا إلى الحراري أثناء فترة التشغيل التالية.

في حالة التشغيل لمدة قصيرة بين فترات توقف طويلة، فإن تلك الحوائط على الحراريات العازلة تكون مفضلة، لأن قليل من الحرارة مختزن فيها. الفقد في الحرارة

بتشتت الحرارة المختزنة في الحراريات يتم تعيينه بوقت التشغيل ووقت التوقف. إذا كان الفرن يعمل لمدة ٢٤ ساعة كل ثالث يوم. عمليا كل الحرارة المختزنة في الحراريات تفقد ولكن إذا كان الفرن يعمل ٨ ساعات كل يوم فإنه ليس كل الحرارة المختزنة في الحراريات يتم انتشارها وتشتتها.

الفقد في الحرارة بالإشعاع خلال الفتحات:

الطوب الأحمر الداخلي يشع كم كبير من الحرارة مثل الأجسام السوداء خلال الشقوق المتسعة أو الضيقة وفتحة الباب.

الفقد في الحرارة بتسرب الغاز:

الفقد في الحرارة بسبب غازات الفرن الخارجة من الصعب تقديرها. تسرب الغاز له تأثير واضح عن فقد الحرارة من الحائط. في حالة الأبواب المحكمة، فإن الفقد يجب أن لا يزيد عن ٢% من كل الحرارة المنتجة في الفرن. في حالة الأبواب الغير محكمة وحيث اللهب أو نافورات الغازات الساخنة الموجهة نحو الأبواب قد تصل بسهولة إلى ٨% وقد تزيد عن هذه الكمية.

الفقد في الحرارة في حالات خاطئة:

الفقد في الحرارة بسبب بروز جزء من الشحنة خارج الفرن: يحدث الفقد في الحرارة بسبب انتشار الحرارة من جزء المعدن خارج الفرن وفي الهواء. خلال الفترة الزمنية للتسخين، فإن الحرارة تتدفق من الجزء الذي في الفرن إلى الجزء خارجه، حيث جزء من هذه الحرارة ينتشر من الجزء الخارجي بالإشعاع والحمل الحراري.

الفقد في الحرارة إلى الملقاط (Tongs) وماكينات الشحن:

الملقاط البارد يمتص الحرارة عند وجوده في الفرن. الملقاط دائما يكون باردا عند دخوله الفرن ذلك إما لتبريده بالمياه أو لوجوده في حوض ماء. رغم أن تدفق الحرارة إلى الملقاط أقل من الحرارة التي يتم إشعاعها خلال الأبواب المفتوحة إلى أنها تعتبر كبيرة. الحرارة المنقولة إلى الملقاط هي نتيجة (١) السطح المعرض للملقاط (٢)

الفترة الزمنية التي يوجد خلالها الملقاط داخل الفرن (٣) معامل الإشعاع.

الفقد في الصواني، سلاسل النقل والبكر:

عدم العناية بهذا البند كان السبب في عدم قدرة الفرن على تحقيق الطاقات واستغلال استهلاك الوقود. الصواني أو أي حاويات أخرى عادة تحصل على نفس درجة الحرارة مثل الشحنة وكمية الحرارة التي تخرج بها من الفرن يمكن تقديرها من وزنها ومن بيان المحتوى الحراري.

الحرارة التي تحمل خارج الفرن بواسطة نواتج الحرق:

في أفران الحرق، يحدث نوعين إضافيين من الفقد في الحرارة. هذا الفقد يكون بسبب الطاقة الحرارية التي تأخذها نواتج الاحتراق خارج الفرن في شكل وقود غير محترق وفي شكل حرارة ملموسة بسبب درجة الحرارة المرتفعة.

الكفاءة الحرارية:

تحقيق الكفاءة الحرارية العالية يكون مطلوبا في كل عمليات التسخين. هذا يعني أن السعرات الحرارية المتاحة في الوقود يجب أن توجه كلها ما أمكن ذلك نحو الشحنة مع أقل فقد في الحرارة نحو المجال المحيط وبعد تحقيق التأثير الحراري المطلوب على الشحنة فإنه يجب إعادة استخدامها لغرض آخر ما أمكن ذلك.

أحد الطرق لخفض معدل الفقد في الحرارة نحو المجال المحيط هو باستخدام العزل أو الحشو والتبطين للفرن. ما بين الغرفة الساخنة والحائط الخارجي. استخدام العزل يتم عمله جيدا حيث درجة الحرارة المنخفضة أو المتوسطة تستخدم في خطوط البخار، وأفران المعالجة الحرارية الصغيرة التي تعمل على دفعات. (batch)، ولكن يكون عمليا في الوحدات ذات درجات الحرارة المرتفعة إلى حد ما مثل المسترجعات (recuperators)، أفران الفخار، وبعض أفران المعالجة الحرارية وخاصة في حالة استخدام التسخين بالانتقال الحراري بالتدفق المعاكس.

الفصل الثانى

2

استعادة الحرارة العادمة في الأفران

Waste Heat Recovery in Furnaces

الميزان الحراري في الأفران:

فـــي حالة الأفران والغلايات، يتم الإمداد بالطاقة في شكل حرارة إما للشحنة لتـــسخينها إلـــى المـــستوى المطلوب أو للماء لإنتاج البخار بالنوعية المطلوبة، على التوالـــي. الميزان بين الكتلة والطاقة الحرارة مبني على قوانين المحافظة على الطاقة والكتلة. لذلك، فإن كلا من المادة والطاقة الداخلة في العملية يأتي بدون أي فقد إما في نفس الشكل أو في غيره. بالنسبة للمفاعلات النووية هذه الحقيقة ليست صحيحة، حيث تتحلل الكتلة لتوليد الطاقة. في الأفران التي تعمل بوقود الحرق، يصبح الوقود من بين بنود الإنفاق الهامة ولذا فإن اقتصاديات استخدامه يعتبر من الأمور الأساسية. للتصميم الناجح للفرن، فإن المعلومات لكل البنود المحتملة للاستهلاك والفقد له أهمية كبيرة في حساب معدل استهلاك الوقود.

الكفاءة الحرارية للفرن وهي نسبة كمية الحرارة المستخدمة إلى الكمية الكلية للحرارة التي تم الإمداد بها، وهذه تتغير في مجالات كبيرة، من المخفضة حتى ١٠%

إلى الأفران الميتاليرجية حتى ٦٠% أو حتى أكثر من ٩٠% في حالة الوحدة الحرارية ذات التصميم الحراري الجيد. الكفاءة الحرارية المنخفضة لبعض الأفران الميتاليرجية يرجع إلى كمية صغيرة من الحرارة المستهلكة حقيقة للاستخدامات المفيدة.

تقييم اقتصاديات الوقود أو الكفاءة يمكن الحكم عليه بالميزان الحراري والذي يحتوي كل بنود المدخلات والمخرجات للعملية وميزانها. عند عمل الميزان الحراري، فإن كل البنود يجب كذلك التعبير عنها بنفس البنود لذلك فإن هذه تكون ذات مقارنة. الميزان الحراري يجب أن يبنى إما على فترة زمنية معينة، مثل دورة العمل كل ساعة أو كل يوم أو وحدة نوعية المنتجات الأولية/ النهائية.

في حالة الميزان الحراري لبنود المدخلات والمخرجات يتم أخذهم منفصلين كالآتي:

المدخلات:

١. الكيماويات أو طاقة الوقود، الحرارة المدركة للوقود، هواء الحرق والشحنة، الطاقة الكهربية أو الميكانيكية التي يتم توفيرها كأدوات إضافية مثل المراوح والطلمبات.
٢. الحرارة المنبعثة بسبب التفاعل المنتج للحرارة (في حالة وجوده).

المخرجات:

١. المحتوى الكلي من الحرارة للمواد الخارجة (الحرارة الملموسة/ أو الحرارة الكامنة).
٢. الحرارة الممتصة في التفاعل الماص للحرارة (endothermic) أو في تغير المجال أو في ارتفاع درجة الحرارة ثم التغير في المجال.
٣. الحرارة الكلية للغازات الخارجة (الحرارة المدركة، والحرارة المختزنة في البخار الخارج، حرارة الوقود).
٤. الفقد في الحرارة خلال الحوائط والأسقف، الشقوق والفواصل بالتوصيل والإشعاع.

٥. فقد ثانوي وخاص، مرتبط بالعملية.

الميــزان الحــراري الكلي المتضمن إجمالي الطاقة الداخلة والخارجة بسيط نسبيا ويعطــي فكرة حول الكفاءة الكلية فقط، ولكن ليس المساهمة المؤثرة للأقسام المختلفة مــثل طبقة الوقود، غرفة الحرق، المسترجعات للاستفادة من حرارة الفرن المنصرفة (recuperator).....الــخ. للحصول على الكفاءة الحقيقية لكل جزء على حدة فإنه يلزم عمل ميزان حراري تفصيلي لكل بند والذي يمكن أن يكون عملا صعبا ومجهدا ولكن في حالة عدم عمل الميزان المستقل لكل جزء فإن تصميم هذه الوحدات سوف لا يكون ممكنا. في حالة المدخلات يتم حساب الطاقة الكيميائية من حاصل ضرب كمية الوقود وقيمــتها الحــرارية، الحــرارة المدركة من ناتج كتلة المادة، الفرق في درجات بين الأساس والحرارات النوعية. التأثيرات الحرارية، سواء كانت منتجة للحرارة أو ماصة للحــرارة التــي يمكن أن تحدث في العملية يمكن جمعها من المراجع وحسابها على أساس مقبول. كل هذه يمكن جدولتها كمدخلات ومخرجات وعمل الميزان.

توزيع الحرارة في الفرن:

فــي تــشغيل الفرن، يجب وجود معرفة واضحة عن توزيع الحرارة التي يتم إمدادها للفرن. حرارة الحرق المنبعثة في مقطع الحرق يتم انتقالها بكل الطرق الثلاث لانــتقال الحــرارة (أي التوصــيل والإشعاع والانعكاس) إلى الشحنة. هذا ما يعرف بالتحمــيل الحراري الحقيقي للفرن. بجانب ذلك، يتم انتقال الحرارة إلى الخارج خلال الحــوائط والسقف، خلال الأرضية إلى الأرض وخلال الشقوق والفتحات الأخرى في الفــرن. الحــرارة تمــر كذلك إلى الخارج خلال الباب عند فتحه الكمية الكبيرة من الحــرارة تــذهب إلى خارج غرفة الفرن مع الغازات العادمة الساخنة، كحرارة كامنة وحرارة مدركة. كل هذه الكميات عند إضافتها معا تشمل كمية الحرارة الحقيقية اللازم توفيرها للفرن خلال حرق الوقود بما يمكن الفرن من العمل طبقا لطاقته التصميمية. عــدا الحمــل الحقيقي للحرارة فإن كل البنود الأخرى تكون الفقد للفرن، والذي يسمى

الحـــرارة المفقـــودة. في حالة الاستخدام المناسب أو الاستعادة للحرارة المفقودة، فإنه يمكـــن توفير كمية مكافئة من الوقود بما يحسن من الكفاءة الكلية للفرن. النظام الذي ينطبق عليه هذا يسمى نظام استعادة الحرارة المفقودة (waste heat recovery system).

مصادر الفقد الحراري من الفرن:

جـــزء فقـــط من مدخلات الحرارة للفرن هو الذي يستخدم بواسطة الشحنة أو العملـــية ومعظم الأجزاء يذهب بدون استخدام مع الغازات العادمة وكذلك يفقد خلال الحوائط والفتحات في الفرن.

الفقد الحراري في الفرن يمكن تقسيمه إلى ثلاثة أنواع:

- الفقد الحراري من حوائط الفرن.
- الفقد الحراري من الفتحات والشقوق.
- الفقد الحراري خلال الغازات العادمة.

الفقد الحراري من حوائط الفرن:

يتم فقد الحرارة إلى المجال المحيط بالإشعاع والانعكاس من السطح الخارجي لحوائط الفرن وبالتوصيل إلى الأرض. حوائط الفرن التي بنيت من الطوب الحراري العازل والمغلفة في غلاف من الصلب تقلل سريان الحرارة إلى الوسط المحيط. خفض الفقـــد في الحرارة، بتوفير العزل الجيد لا يعني بالضرورة توفير تكلفة، لأن التكاليف الثابتة للعزل قد تزيد عن تكاليف توفير الوقود. لذلك ، فإن كمية العزل يجب إقرارها بحرص عند اعتبار الاقتصاديات الكلية.

الفقد الحراري من الفتحات والشقوق:

قـــد يكـــون هناك فتحات مختلفة في الفرن، مثل ثقب المراقبة (peephole) ، أبواب التفتيش. أبواب الشحن والتفريغ، التي تسبب الفقد الكبير في الحرارة، حيث يلزم فـــتح هـــذه الأبـــواب في أقل فترة زمنية اللازمة فقط لشحن وتفريغ الشحنة. الفتحات الأخـــرى في الفرن يجب أن تظل مقفلة لمنع الفقد الحراري بتسرب الغازات الساخنة

مـــن الفرن أو من خلال دخول الهواء البارد إلى الفرن. الشقوق في حوائط الفرن يتم صيانتها لتجنب تسرب الغازات.

الفقد في الحرارة خلال الغازات العادمة:

يمكـــن خفـــضها بوجود ا لنسبة الصحيحة بين الوقود والهواء لتأكيد الحرق الكامـــل للوقود مع أدنى كمية ممكنة من الهواء. إذا كان الحرق غير تام، فإن الوقود الغيـــر محترق سوف يمر إلى الخارج مع الغازات العادمة. على الجانب الآخر الكمية الكبيرة من الهواء سوف تحتاج حرارة لتسخينها إلى درجة حرارة الفرن وعندئذ سوف تمر نفسها إلى الخارج مع الغازات العادمة.

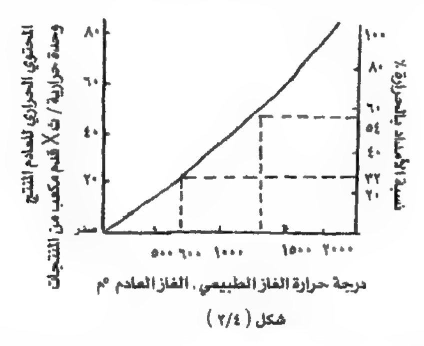
استعادة الحرارة المفقودة (Waste Heat Recovery)

على الرغم من استخدام الوقود بحكمة وعدم الفقد في الحرارة باستخدام هواء زائد قليل جدا أو كثير جدا، بتوفير العزل المناسب أو بتوفير خواص الانتقال الحراري الـــضعيف للمهمات، فإن الحرارة سوف يظل صرفها من المعدة بسبب درجة الحرارة التي تتم عندها العملية.

فمـــثلاً، عـــند تسخين فرن إلى ١٢٠٠ ° م فإن الوقود الأولي يجب أن يوفر درجة حرارة أعلى من ١٢٠٠ °م، درجة حرارة للغازات العادمة يجب أن تكون أعلى مـــن ١٢٠٠ °م. فـــي فرن الدفعات (batch) يتم صرف الغازات من الفرن عند درجة الحرارة هذه حتى في حالة أفضل النظم. الغازات التي تترك الفرن عند درجة الحرارة هـــذه تحتوي على نسبة كبيرة من الطاقة التي تم إمداد الفرن بها في شكل وقود. وهذه هي الحرارة التي تفقد. الحرارة المفقودة يمكن تعريفها بأنها الحرارة في نواتج الحرق التي تصرف عند أداء مهمتها الأولى. بالنسبة لأي كفاءة فإن الاعتبار الأساسي هو أن الحـــرارة المفقودة ليست زائدة أو مفقودة على حساب عدم كفاءة الأداء الأولي ولكنها قابلـــة للاســـتخدام في الأغراض الأولية (التسخين الأولي). المحتوى الحراري لنواتج الحرق يرتفع بارتفاع درجة الحرارة ولذلك، فكلما كانت الغازات العادمة أكثر سخونة،

كلما زادت كمية الحرارة التي يمكن استعادتها.

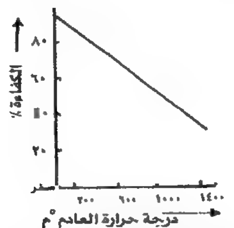
الشكل (٢/٤) يوضح اختلاف المحتوى الحراري لنواتج الحرق المكافئة للغاز الطبيعي مـع درجة الحرارة. محور محتوى الحرارة على المخطط يوضح الوحدات الحرارية في الثانية/ القدم المكعب (Btu/ sft3) لنواتج الحرق وكنسبة للحرارة الكلية المتاحة من الوقود.



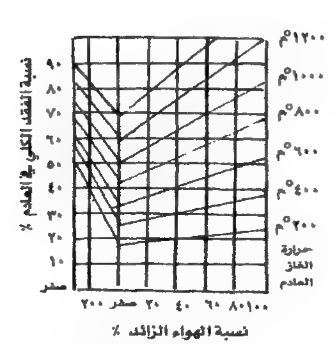
شكل (٢/٤)

من هذا يمكن أن نرى أنه في حالة صرف الغازات عند ١٣٠٠ °م، فإن ٧٠% مـن الوقـود يـذهب إلـى العادم في المنتجات العادمة، حتى عند درجات الحرارة المنخفضة يتم فقد كميات كبيرة من الطاقة بهذه الطريقة.

الـشكل (٢/٥) يوضح أقصى كفاءة ممكنة للعملية خلال مجال درجات حرارة خروج الغازات العادمة. وهذا عكس شكل (٢/٤).



شكل (٢/٥) يوضح كفاءة الأنتقال الحرارى من نواتج الأحتراق مقابل درجة حرارة الغاز الخارج العادم



شكل (٢/٦) نسبة الفقد الكلي في العادم الغاز الطبيعي

كمـــية الحرارة المتاحة في هذه الغازات العادمة لذلك تكون كبيرة ومن المهم ملاحظـــة أن الكمـــيات النـــسبية للحرارة المفقودة بحرق الهواء الزائد وفي الحرارة المفقـــودة. شـــكل (٢/٦) يوضح الاختلاف في كمية الحرارة في نواتج الحرق الناتجة بحجم ثابت من الغاز عند مجال معاملات الهواء الزائد. من هذا المخطط نرى أن الفقد فـــي العادم يزداد بزيادة مستوى الهواء ا لزائد. ولكن عند صفر هواء زائد فإن كمية الفقد الحراري عند درجات الحرارة العالية تكون كبيرة.

استخدام الحرارة الفاقدة كمصدر حراري ثانوي:

في كل عمليات التسخين في الصناعة، يتم فقد حرارة ثمينة في المنتجات. هذا يمكن اعتباره كمصدر ثانوي للطاقة ويمكن أن يحقق مساهمة اقتصادية حقيقية في كل العملية الحرارية في حالة استخدامها خلال إعادة استخدامها.

فـــي بعض الحالات يمكن استخدام الغازات العادمة مباشرة في عملية مجاورة أو للتـــسخين المسبق أو لتجفيف المواد المطلوب تصنيعها. ولكن في معظم الحالات، فـــإن الحرارة المفقودة يكون استخدامها مؤثر و مباشرا في العملية التي تم إنتاج هذه الحـــرارة منها ذلك باستخدامها في تسخين الهواء اللازم للحرق. نظام التدوير هذا له مميزات كبيرة من بينها أنه لا يوجد فقد حراري الذي لا يمكن استخدامه.

الذي يمكن استعادته هو فقط الحرارة المدركة (الملموسة) في الغاز العادم إلى حـــد ما. الاستعادة الكاملة للحرارة المفقودة غير ممكن نظريا أو اقتصاديا ولذلك فإنه ينصح باستعادة أقصى كمية من الحرارة.

التقنيات الرئيسية لاستعادة الحرارة المفقودة هي:

- الاستعادة كبخار خلال غلايات الفقد الحراري.
- كحـــرارة ملموســـة خـــلال المـــولدات و جهـــاز اســـتعادة استخدام الطاقة (recuperators).
- التسخين المسبق للشحنة الساخنة بما يقارب المنطقة الساخنة.
- التـــسخين العالي للبخار، التسخين المسبق لمياه تغذية الغلايات وهواء الحرق

في الغلايات.

غلايات الحرارة العادمة: (Waste Heat Boilers)

تلك الغلايات تعمل بالحرارة الفاقدة في الغازات العادمة. وهي مفيدة في حالة درجة حرارة الغاز العادم أقل من ٦٥٠ – ٧٥٠ °م. التوزيع الأولي بين الوقود وغلايات البخار التي تعمل باللهب وغلايات الحرارة العادمة هي أن انتقال الحرارة في الأولى أكبر بسبب الإشعاع بينما في الثانية هي أساسا بالانعكاس والتوصيل كما في حالة دخول الغازات العادمة معظمها من نوع غلايات ماسورة اللهب (fire tube)، حيث الحرارة الملموسة للغازات تستخدم فقط لتحويل الماء إلى بخار. البخار الذي يتم إنتاجه يستخدم كمجال تسخين في العمليات أو في التفاعلات، كما في حالة غاز الماء أو إنتاج الغاز المعدل (reformed). حيث أنه يعمل على منتجات الحرق، فإن مخاطر انفجاره تكون قليلة.

كميات الغازات التي يتم تداولها بغلايات الحرارة العادمة كبيرة نسبيا مقارنة بتلك ذات حرق الوقود لذلك فإن الخفض في الضغط بسبب التدفق يكون أعلى. غلايات الحرارة العادمة تصبح ضخمة بسبب الأسطح ذات التبادل الحراري العالي التي تتوفر لكل من معامل الانتقال الحراري وفرق درجة الحرارة بين البخار المنتج والغازات العادمة لكونهم بقيم منخفضة.

يتم توفير السحب الكافي للتغلب على تلك المقاومات. في حالة أفران حرق الفحم أو الوقود الغاز الغير نظيف، يكون من الضروري تنظيف الأنابيب لمنع ترسيب جسيمات الأتربة والغبار في الأنابيب والتي تزيد من مقاومة تدفق الغازات والحرارة. الأنابيب يمكن تنظيفها بفرش من السلك، بما يمكن من مراجعة للترسيبات المستديمة. في حالة الغلايات ذات الماء في الماسورة يتم استخدام طرق كسح السناج لهذا الغرض.

كمية الحرارة التي سيتم استعادتها في غلايات الحرارة العادمة تتوقف على

درجة حرارة الغازات. يتم تصميم الغلاية على أساس الكمية الكلية للحرارة المحسوسة في الغازات التي تتناسب مباشرة مع كمية درجات حرارة الدخول والخروج ويتم نقل كمــية أقــل من الحرارة إذا كانت درجة حرارة المدخل انخفضت وبذا يصبح ضغط البخار أقل مع إتلاف كمية البخار.

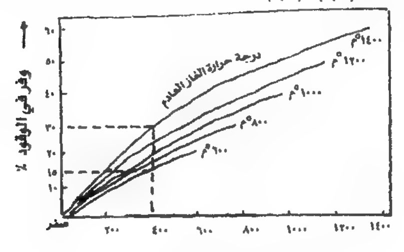
يمكن خفض درجة حرارة الغاز الداخل بإدخال الهواء البارد في الغلاية. فهو لا يخفــض فقــط معدل إنتاج البخار ولكن يزيد كذلك حجم الغازات التي يتم تداولها بواسطة المروحة وتزداد متطلبات الطاقة. يتم أخذ الاحتياطيات المناسبة لإبعاد دخول الهواء إلى خط الغاز.

المسترجعات: (Recuperators)

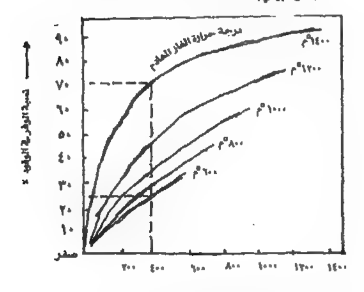
انــتقال الحــرارة من مجرى سائل ساخن إلى مجرى بارد يتم في المبادلات الحرارية، حيث لا يتم الاختلاط بين كل من تدفقات كل السائلين، حيث يكون منفصلين بواســطة فاصل مقوي. الأكثر شيوعا هي المبادلات الحرارية ذات الأنبوبة والغلاف (shell and tube)، حيث يتحرك سائل خلال الأنابيب والآخر خلال الغلاف. وهما في عمــل مستمر. المسترجعات هي مبادلات حرارية مصنوعة إما من أنابيب معدنية أو مــن قــنوات مــن مادة حرارية. نظرا لحدود درجات حرارة التشغيل للمعادن، فإن المواســير/ القنوات الحرارية تنشأ للعمل عند درجات الحرارة المرتفعة. وهذه تصبح ضــخمة وأحيانا مسببة للتسرب (leaky) بسبب صعوبة الإنشاء ولكن تعمل كمستودع حراري حيث التغيرات في درجة الحرارة بين السوائل الساخنة والباردة يكون متدني. يمكــن اعتــبار المسترجع أنه مبادل حراري الذي ينقل الحرارة عبر الفرن من جانب حيث تدفق الغازات العادمة وعند الجانب الآخر حيث هواء الحرق ونادرا وقود الغاز.

الفــرق الأساسي بين هذا والمجدد أو المسترجع (regenerator – الذي يعيد بعــض الحرارة المنصرفة إلى الغاز [أو الماء] الداخل). في العمل، هو أن المسترجع (recuperator) هــو نظــام العمل باستمرار ولكن المجدد (regenerator) يعمل بطريقة متقطعة حلقية). في حالات معينة نتائج الاسترجاع يمكن استنتاجها. الاسترجاع يستخدم

عموما في الأفران الضخمة بسبب ارتفاع التكاليف الرأسمالية. الوفر في الوقود (الغاز الطبيعي) الذي يمكن الحصول عليه باستخدام المسترجع للتسخين المسبق للهواء يمكن تعيينه من الشكل (٢/٧)، (٢/٨).

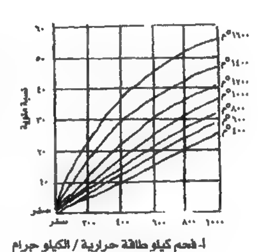


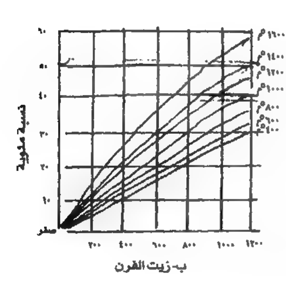
شكل (٢/٧) اختلاف وفر الوقود مقابل التسخين المسبق للهواء لمختلف درجات حرارة الغازات الخارجة من الفرن (غاز طبيعي)

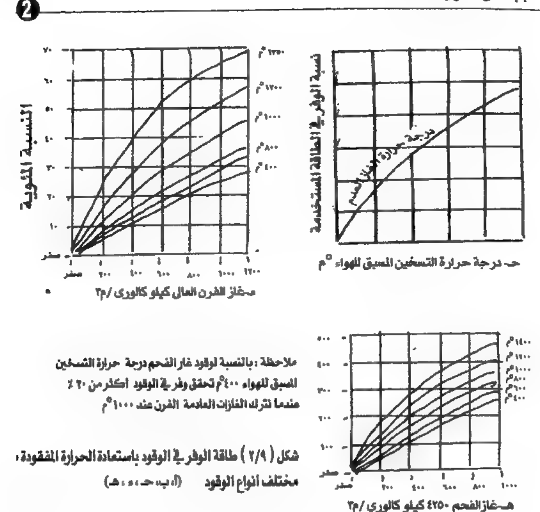


شكل (٢/٨) اختلاف الوفر في الوقود مقابل التسخين المسبق للهواء لعدد من درجة حرارة الغاز العادي من الفرن للهواء الزائد بنسبة ٥٠٪ (غاز طبيعي)

مـــن هذه العلاقة يتضح أن التسخين المسبق لنفس الهواء يمثل نسبة أكبر من توفيـــر الحرارة الكلية الداخلة كلما كانت درجة حرارة الغاز العادم أعلى. هذا المعامل هام عند تقييم قيمة المسترجع لمختلف العمليات. فمثلا الشكل (٢/٧) التسخين المسبق عند ٤٠٠ °م يعطي وفر في الطاقة قدره ١٥% عندما تكون درجة حرارة الغاز العادم ٦٠٠ °م، وحوالـــي ٣٠% عندما تكون درجة حرارة الغاز العادم ١٤٠٠ °م. هذا لأن الفقـــد في الغاز العادم عند ١٤٠٠ °م هو ٥٤% من الحرارة الكلية الداخلة، بينما عند ٦٠٠ °م يكـــون الفقـــد ٣٢%. شكل (٢/٤). استخدام الهواء الزائد للحرق يزيد جهد الوفـــر فـــي الوقـــود كمـــا هو موضح في الشكل (٢/٨). إمكانية اقتصاديات الوقود بالتسخين المسبق للهواء باستعادة الحرارة المفقودة بنوع الوقود موضح في الشكل (٩/٢).



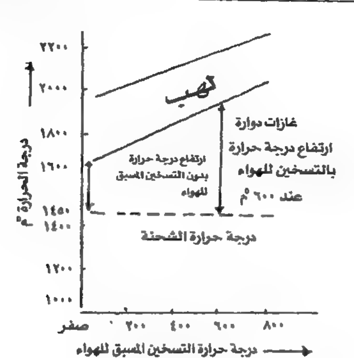




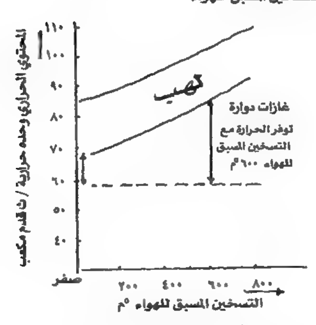
ملاحظة : بالنسبة لوقود غاز الفحم درجة حرارة التسخين المسبق للهواء ٤٠٠ °م تحقق وفر في الوقود أكثر من ٢٠ ٪ عندما تترك الغازات العادمة الفرن عند ١٠٠٠ °م

شكل (٢/٩) طاقة الوفر في الوقود باستعادة الحرارة المفقودة ، مختلف أنواع الوقود (أ ، ب ، حـ ، د ، هـ)

نتيجة التسخين المسبق للهواء في درجات حرارة لهب المسترجع تزداد ويمكن الحصول على معدلات انتقال حراري أعلى . تأثير التسخين المسبق للهواء على درجة حرارة اللهب ودرجة حرارة غاز الفرن موضح في الشكل (٢/١٠) ، الشكل (٢/١١). على التوالي لعملية تعمل عند ١٤٥٠ °م. الفرق في درجات الحرارة بين الغازات التي يـتم تدويـرها والشحنة يتضاعف بالتسخين المسبق لهواء الحرق عند ٦٠٠ °م. هذه الـزيادة في معدل الانتقال الحراري تؤدي إلى قصر دورات التشغيل وتحسين الكفاءة وخفض تكاليف الوقود.



شكل (٢/١٠) اختلاف درجة حرارة اللهب مع التسخين المسبق للهواء



شكل (٢/١١) اختلاف المحتوي الحراري لنواتج الحرق عند درجة حرارة اللهب مع التســـخين المسبق لهواء

المسترجعات المعدنية أكثر كفاءة بسبب المقاومة المنخفضة لسريان الحرارة والإنشاء المدمج القوي. ولكن المسترجعات المعدنية لا يمكن استخدامها عند درجة حرارة أعلى من ٧٠٠ °م، نظرا لأن التآكل يسود عند درجات الحرارة العالية. الأنواع المختلفة من المسترجعات موضحة في الشكل(٢/٢٤) وهي:

- ذات التدفق الموازي.
- ذات التدفق المعاكس.
- ذات التدفق المتقاطع.

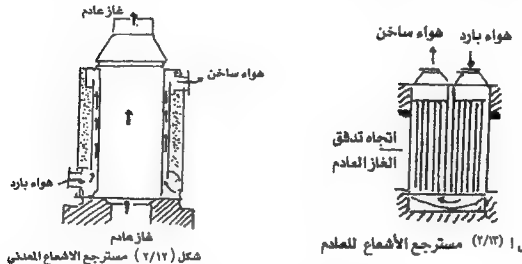
في التدفق الموازي يكون كلا من السوائل.الساخنة والباردة في نفس الاتجاه حيث تنتقل الحرارة أثناء التدفق. في التدفق المعاكس تتحرك السوائل في اتجاهات معاكسة، بينما في التدفق المتقاطع فإن السوائل تتحرك بزاوية قائمة بالنسبة لكل منهما. تنخفض درجة حرارة السائل الساخن، وترتفع درجة حرارة السائل البارد. توزيع درجة الحرارة على طول المسترجع للتدفق الموازي والتدفق المعاكس والتقاطع موضح في الشكل (٢/٢٤). درجة الحرارة في الأنابيب وحولها تختلف من القمة إلى القاع.
مسترجعات التدفق المعاكس هي الأكثر كفاءة. يمكن تسخين الهواء أو غاز الوقود قريبا جدا من درجة حرارة الغازات العادمة الساخنة والفرق في درجة الحرارة بين السوائل الساخنة والباردة يكون ثابت غالبا خلال طول الممر. في حالة التدفق الموازي أقصى تسخين مسبق يمكن الحصول عليه فقط نظريا حتى متوسط درجة حرارة لكل من السائلين القادمين، والذي لا يتم تحقيقيه عمليا. التدفق المعاكس عادة لا يتم استخدامه.

طبقا لشكل الانتقال الحراري فإن المسترجعات المعدنية تكون من ثلاث أنواع وهي الإشعاع، الانعكاس والنوع الذي يجمع بين الإشعاع والانعكاس.

مسترجعات الإشعاع: (Radiation Recuperator)

في مسترجعات الإشعاع تدخل نواتج الحريق إلى المسترجع خلال فتحة في سقف الفرن حيث يتدفق الهواء عند سرعة أعلى خلال حلقة ضيقة بين الحوائط

الداخلية والخارجية. الغلاف الخارجي يكون معزولا. يتم توفير ريش أو زعانف (fins) على الجدار الداخلي لزيادة مساحة الانتقال الحراري. هذا النوع من المسترجع البسيط مناسب تحديدا للأفران الصغيرة للطرق (forging). وهذا موضح في الشكل (٢/١٢). كما يوجد مسترجع الإشعاع الجانبي الموضح في الشكل (٢/١٣).



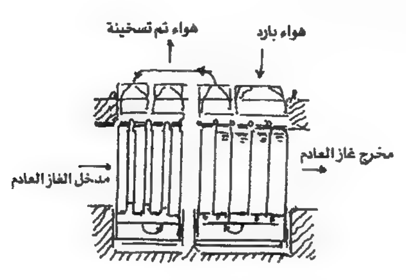
شكل (٢/١٢) مسترجع الاشعاع المعدني

شكل (٢/١٣) مسترجع الأشعاع للعادم

مسترجعات الإشعاع يمكن أن تعمل بدرجات حرارة الغاز العادم في المجال من ١٠٠٠ – ١٥٠٠ °م للتسخين المسبق للهواء حتى ٦٠٠ °م. مميزات مسترجع الإشعاع نسبة إلى مسترجع الانعكاس هو أن الانتقال الحراري يكون كثيفا خلال الإشعاع كما يوفر كذلك احتمال تسخين مسبق أعلى للهواء. مميزات أخرى هي الخفض في فقد الضغط في جانب الغاز العادم بسب بكبر المقاطع، وبذا يزيد احتمال استخدام الغازات العادمة المحملة بالغبار.

مسترجعات الانعكاس: (Convection Recuperator)

هذه الأنواع من المسترجعات إما أن تكون بنظام التسخين المصنع من مواسير الصلب المسحوبة أو مواسير الحديد الزهر. مسترجعات الانعكاس تستخدم مع درجات حرارة الغاز العادم من ٣٠٠ – ١٠٥٠ °م. درجة التسخين المسبق للهواء محدودة عند ٦٠٠ °م. مسترجع الانعكاس الأنبوبي موضح في الشكل (٢/١٤).



شكل (٢/١٤) مسترجع انبوبي بالأنعكاس

مسترجع الجمع بين الإشعاع والانعكاس

Combined Radiation and Convection Recuperator

مميزات مسترجعات الإشعاع والانعكاس تكون مجمعة في نظم أسطح الانتقال الحراري. في هذا النظام، يتم تنظيم حزمة من الأنابيب في حلقة داخل مسترجع من نوع الغلاف المزدوج. كل ارتفاع ٢١ °م في درجة حرارة هواء الحرق يحقق وفر في وقود سائل بقيمة ١%. يزداد الوفر مع زيادة درجة حرارة اللهب، خفض مستوى الهواء الزائد، وزيادة إنتاجية الفرن.

تلف المسترجعات المعدنية:

أجزاء المسترجعات التي تصل إلى درجة حرارة ٥٠٠ °م وأعلى تكون معرضة للأكسدة بالأكسجين، بخار الماء أو ثاني أكسيد الكربون الموجود في الغازات العادمة. درجة العدوانية تعتمد على درجة حرارة الفرن بالإضافة إلى تركيز المؤكسدات في الغازات. ولكن، السبائك يمكن أن تقاوم الأكسدة حتى درجة حرارة ١١٠٠ °م ولكن سيكون المسترجع معرض للترسيبات (scaling) ويحتاج إلى الاستبدال. العناصر السبائكية في الصلب مثل الكروم، النيكل، السيليكون تستخدم

لتحمل العمل في درجات الحرارة العالية.

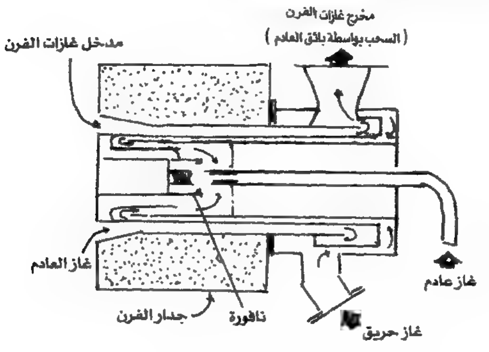
عدوانية الكبريت في الغازات العادمة تتوقف على طبيعة الغازات (مؤكسدة أو مختزلة)، درجة حرارة الغازات، درجة حرارة الحائط ونوع المعدن المستخدم كأسطح تبادل حراري، ووجود أكاسيد الفاناديوم والكبريت في الغازات العادمة يكون عدوانيا. عند النهاية البادرة للمسترجع قد يحدث تآكل حامضي بسبب عدوانية الكبريت، إذا انخفضت درجة حرارة المعدن إلى أقل من نقطة الندى للغازات. نقطة الندى للحامض لمنتجات الحريق تعتمد أساسا على المحتوى من الكبريت في الوقود وتتغير ما بين ١٣٠مْ بـ ١% كبريت إلى حوالي ١٨٠ مْ بـ ٤% كبريت في الوقود. مشكلة تآكل درجة الحرارة المنخفضة يتم الحذر منها عند تصميم المسترجع، بتأكيد أن درجة حرارة الحائط في كل أجزاء المسترجع هي فوق نقطة الندى للحامض للغازات باختيار الإطار المناسب لتدفق الغاز/ الهواء وأي تغيرات أخرى في الشكل الإنشائي للمسترجع.

تآكل درجة الحرارة العالية للمسترجعات هو التآكل الذي يحدث على الأسطح المعدنية في مجال معين من درجة الحرارة بسبب القليل جدا من ملوثات الفاناديوم (traces) في رماد الوقود. الأكاسيد المعدنية الغير مذابة في رماد الوقود مثل خامس أكسيد الفاناديوم وأكسيد الصوديوم تحدث تآكل حاد عندما تكون درجة حرارة المعدن حوالي ٦٨٠ °م. أخطار تآكل درجة الحرارة العالية يمكن تجنبها بالمحافظة على درجة حرارة جدار المعدن للمسترجع أقل من ٦٨٠ °م. وهذه الحدود ليست موجودة في حالة المسترجع من السيراميك. التشقق والتسرب في أجزاء التبادل الحراري للمسترجع يرجع إلى التمدد الحراري لا يتم بانتظام في الأجزاء المختلفة من المسترجع. أحيانا، يحدث هذا كذلك في المسترجعات التي يفترض أن تتمدد في اتجاه معين حيث تعاق بسبب أو حيود أو تغير في الغلاف الحراري للمسترجع. هذه المشكلة يمكن مقاومتها بالانتباه نحو التمدد الحراري في المسترجعات المعدنية في مرحلة التصميم.

مقارنة بين المسترجعات المعدنية والمسترجعات من السيراميك:

- المسترجعات المعدنية أخف من المسترجعات من السيراميك المكافئة بعشرة أو عشرين ضعف.
- المسترجعات المعدنية تشغل ١٥ إلى ٣٠ ضعف مساحة أصغر ولذلك فإنها تحتاج إلى أعمال مدنية أقل.
- المسترجعات المعدنية هي عمليا مقاومة للتسرب ولذلك فإنه يمكنها تداول غازات الوقود السامة بينما المسترجعات من السيراميك تسبب التسرب إلى حوالي ٥٠% من حجم الغازات والهواء الذي يتم تداوله.
- المسترجعات المعدنية تعتبر اقتصادية عند استخدامها للتسخين المسبق للهواء عند درجة حرارة أقل من ٦٥٠ °م. بينما المسترجعات السيراميك تكون اقتصادية فقط عند التسخين المسبق للهواء لدرجة حرارة أعلى من ٦٥٠ °م.
- المسترجعات المعدنية ذات التصميم الخاص يمكن أن تقوم بالتسخين المسبق للهواء حتى ٦٥٠ °م.
- المسترجعات المعدنية يمكن أن يكون لها فروق أعلى في الضغط بين الغاز العادم وجانب الهواء (١٠٠٠ مليمتر مقارنة بـ ٥٠ – ٧٠ مليمتر للمسترجعات السيراميك.
- المسترجعات المعدنية يسهل صيانتها وإنشائها كما أن تكلفتها الأولية أقل.

موقد الاسترجاع: (Recuperative Burner)

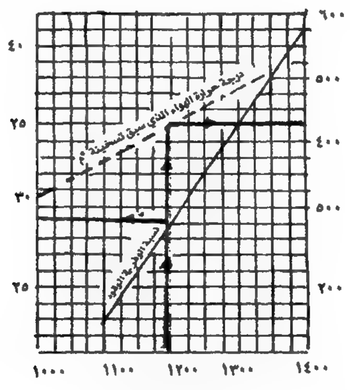


شكل (٢/١٥) موقد المسترجع

موقد الاستخدام هو تطوير حديث في تكنولوجيا المسترجع لحرق الغاز حيث يــزود المـــسترجع بنظام موقد بحيث أن الغازات العادمة يتم سحبها إلى الخلف خلال وحـــدة مجمعـــة. مهمـــة الموقد في وحدة مدمجة واحدة الذي يوفر وسائل اقتصادية لاسـتعادة الحــرارة المفقــودة في وحدة العمل بالمرحلة الواحدة (batch) ذات درجة الحرارة المرتفعة. هنا يتم إمداد الموقد بالغاز العادم والهواء. الغازات العادمة بدلا من الـتخلص منها خلال المسار التقليدي يتم سحبها إلى الخلف خلال الموقد وتستخدم في التـسخين المـسبق لهواء الحرق إلى ٦٠٠ °م كحد أقصى طبقا لنوع الموقد ودرجة حرارة العملية. موقد الاسترجاع موضح في الشكل (٢/١٥).

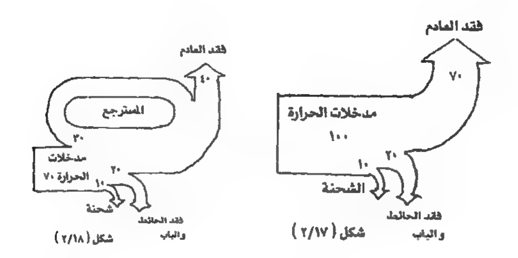
تستخدم مواقد الاسترجاع في تسخين المغرفة من الصلب/ المعدن المستخدمة لــنقل المعدن، وكذلك لحرق مشغولات السيراميك، تسخين كمرات وقطع الصلب في أفــران التسخين المسبق....الخ. إنشاء موقد الاسترجاع يمكن أن يقلل استهلاك الوقود

فـــي عملـــيات التسخين/ الأفران باستمرار. ترشيد الطاقة باستخدام موقد الاسترجاع يتوقف على درجة حرارة الغازات العادمة ودرجة الحرارة المطلوبة في الحـــرق.شكل (٢/١٦) يوضـــح العلاقة بين كمية التسخين المسبق الذي يعطي لهواء الحرق بالتبادل الحراري مع عادم غازات الفرن ونسبة الوقود التي يمكن توفيرها باستخدام هذا النوع من الموقد



شكل (٢/١٦) وفر الوقود باستخدام مواقد الاسترجاع

الـــشكل (٢/١٧)، الـــشكل (٢/١٨) يوضح مخطط الهبوط على التوالي لفرن التـــسخين المسبق ذو الدفعة الواحدة بدون مسترجع وبالمسترجع الذي يشرح أن إنشاء المسترجع قلل الفقد في العادم من ٧٠% إلى ٤٠% وبذلك مدخلات حرارة الوقود من مستوى ١٠٠ إلى ٧٠.



الشكل (٢/١٧) و (٢/١٨) يوضح مخطط الهبوط علي التوالي لفرن التسخين المسبق ذو الدفعة الواحد بدون مسترجع و بالمسترجع

المجددات، المسترجعات: (Regenerators)

المجددات هي مبادلات حرارية مصنعة من الطوب الحراري وتعمل في زوجين (pairs). يتم تنظيم الطوب ليتدفق الغاز خلاله مع فقد قليل في الضغط. تعمل الغرف في دورات تسخين وتبريد. تسخين الغرف يتأثر بالغازات العادمة الساخنة التي تتدفق إلى أسفل حيث تترك غرفة الفرن بعد نقل الحرارة إلى الشحنة في تشغيل الفرن.يتم عندئذ التبريد بمرور هواء و/ أو غازات الوقود خلالها في الاتجاه العلوي في الدورة التالية. في الشكل (٢/٢٤)، خلال الغرف التي على اليسار يتدفق الهواء وغاز الوقود منفصلين ويتم تسخينهم خلال انتقال الحرارة من بناء الطوب. وهم في دورة التسخين. الغرف التي على الجانب الأيمن (التي يمر خلالها الغازات العادمة الساخنة) يتم تسخينها من القمة إلى القاع. وهم في دورة التسخين. درجة الحرارة عند قمة طبقة الطوب أعلى من النهاية السفلى. بعد فترة زمنية محددة حوالي ٢٠ – ٣٠ دقيقة، ينعكس شكل التدفق بمحبس عاكس ويتم تدفق الهواء والغاز خلاف الغرف على الجانب الأيمن ويتم حرق غاز الوقود وتصبح درجة حرارة اللهب أعلى مع توفير

كبيــر فــي الوقــود. يجمــع تصميم المجددات عموما بين القوة الميكانيكية لمقاومة الصدمات الحرارية، أدنى مقاومة لتدفق الغازات، وأكبر زمن للالتصاق، وعدم حدوث اختــناق بــسبب الغبار أو الأدخنة في نواتج الحرق وأقصى انتقال حراري للأسطح المــتاحة. لتجــنب الإجهــاد الحــراري في المواد الحرارية بسبب الخفض في درجة الحــرارة بــين دورات التــسخين والتبريد، الانعكاسات (reversals) تكون ضرورية ويتوقف زمن الانعكاس على الانخفاض في درجة الحرارة المسموح به لأدنى إجهاد. للجمع بين زيادة سطح امتصاص الحرارة مع الاستخدام الاقتصادي لبناء الطوب، يتم أحــيانا اســتخدام أشــكال خاصة. السمك عادة يكون محدود بحوالي ٥٠ مليمتر. يتم استعادة حوالي ٦٠ – ٨٥% من الحرارة المحسوسة من الغازات العادمة أثناء المرور خلال المجدد كتسخين مسبق للهواء و/ أو الوقود الغاز. عند أخذ الحرارة المعادة إلى الفــرن بالتجديد (regeneration) خلال الوقود الغاز والهواء كنسبة مئوية من الحرارة الملموسة في الغازات الخارجة، التي تكون الكفاءة الحرارية الحقيقية لنظم التجديد، فإن أقــصى قيمة يمكن تحقيقها هي حوالي ٤٠% طبقا لدرجة التسخين المسبق التي يسمح بهــا. المجددات تستخدم عند درجات الحرارة الأعلى عن تلك للمسترجعات والتسخين المسبق لما بعد ١٠٠٠ °م.

مــصطلح الــتجديد يطــبق في النظم المستخدمة في الحرق الدوري (cyclic). يــستخدم بالتــبادل اثنــين من القنوات (duckts) مجاري لهواء الحرق ومجاري للغاز العادم، يتم بناء جسر من حوائط الحرارية ذات الفتحات (open work) في كل قناة (أو مجــرى) وهــذا هو المجدد. دورة الحرق تكون بحيث بينما يكون أحد القنوات حاملا هــواء الحرق إلى الموقد، القناة أو المجرى الثاني يحمل الغازات العادمة بعيدا، المولد فــي مجرى العادم يتم تسخينه حتى درجة حرارة الغاز العادم. عند الوصول إلى هذا، يتم انعكاس الحرق أي يصبح مجرى العادم هو مجرى هواء الحرق والعكس صحيح. هــواء الحرق البارد يمر خلال المجدد ويتم تسخينه المسبق قبل الوصول إلى الموقد. التكاليف الرأسمالية تكون مرتفعة والمجدد يكون ضخما وهذا يحد من استخدام المجدد

للأفـران الـضخمة التي تعمل عند درجات الحرارة المرتفعة مثل أحواض الزجاج، أفران المجمرة المكشوفة....الخ. في هذه العمليات، تكاليف الوقود تكون جزء كبير من تكاليف المنتج ومجموع هذا مع درجة الحرارة المرتفعة للغاز العادم تجعل أن استخدام المجددات أساسي والذي يمكن أن يضاعف الكفاءة للعملية من حوالي ١٥% إلى ٣٠%.

فـي الـتجديد أو الاسـترجاع (regeneration) تـوجد علاقة بين حجم الفرن (المجدد)، الوقت بعد الانعكاسات، سمك الطوب الحراري، والتوصيل الحراري للطوب ونسب التخزين الحراري للطوب. زيادة لفترة الزمنية بين الانعكاسات (reversals) يعني تخزين حراري أعلى وبالتالي تجديد أكبر وتكاليف أعلى. بالإضافة إلى أن زيادة الفترة الزمنية للانعكاسات ينتج عنها انخفاض متوسط درجة الحرارة للتسخين المـسبق وبالتالـي خفض اقتصاديات الوقود. تراكم الغبار على الطوب والخبث على سـطح الطوب يقلل من كفاءة الانتقال الحراري في المجدد حيث يصبح الفرن عجوزا أو هـرما. الفقد الحراري من حوائط المجددات وتسرب الهواء إلى الداخل أثناء دورة (فترة) الغاز والتسرب إلى الخارج أثناء دورة (فترة) الهواء يسبب انخفاض واضح في معامـل الانـتقال الحراري. مع أخذ كل هذه العوامل في الاعتبار، فإن المعامل الكلي للانتقال الحراري (للمربعات – checkers) التي تعمل بالغاز الطبيعي يمكن أن يؤخذ ما بين ٤ – ٦,٥ كيلو سعر حراري/ م^{٢}/ الساعة/ ^{o}م.

مـواقد (cowper) هـي من أنواع المجددات الخاصة المستخدمة في صناعة الـصلب للتـسخين المـسبق للهـواء للفرن العالي. في هذه المواقد بدلا من الحرارة الملموسـة، فإنـه تستخدم الحرارة الكامنة في غاز الفرن العالي بحرق الغاز في بناء ترابيعـي (chequered work) في الهواء ثم التسخين المسبق للتيار الهوائي (blast) عند مروره خلال الطوب الساخن في الدورة التالية. عندئذ ترتفع درجة حرارة الهواء أكثر من ١٠٠٠ ^{o}م ويدفع خلال مواسير النفخ (tuyers) إلى الفرن العالي. المجددات تستخدم في أفران الكوك، وأفران المجمرة المكشوفة (open hearth) ، وأفران التسخين للدفعات (batch heating).

المجددات الدوارة (العجلات الحرارية):

Rotary Regenerators (Heat Wheels)

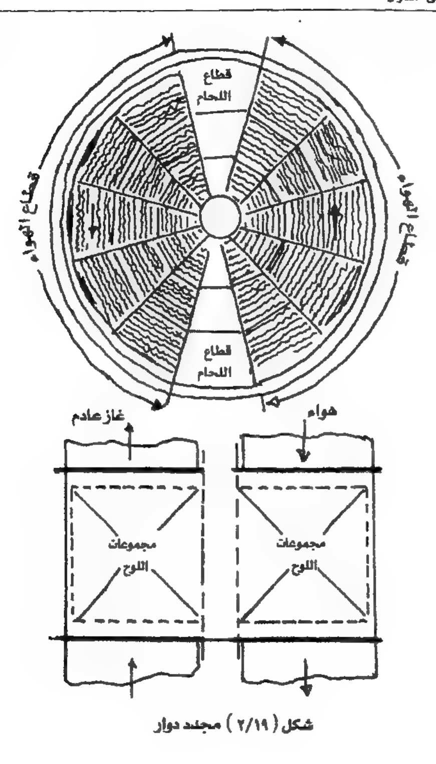
دورة الحــرق الضرورية لاستخدام المجددات ذات الطبقة الثابتة تم التخلص منها من خلال المجددات الدوارة المطورة. القيمة الأصلية لمثل هذه العجلات الحرارية (المجددات الدوارة) تم تنفيذه بواسطة (ljungstron) في الفرن قبل الماضي.

تخــزين وانطلاق الطاقة الحرارية هو الظاهرة الوحيدة للمجددات ذات الطبقة الثابتة التربيعية والمبادلات الحرارية الصناعية المجددة. في المجددات الشبكية الدوارة لـ (لنجستورن)، الدوار الأسطواني المحتوي على أسطح انتقال حراري دوارة (عند ١ – ٣ لفــة فــي الدقــيقة) داخل غلاف (housing) المقسم إلى قسمين. يتم امتصاص الحــرارة العادمــة مــن الغــاز العادم ونقلها إلى الهواء البارد القادم بواسطة السطح (العجلة) الدوار باستمرار للانتقال الحراري المكون من ألواح معدنية (ويسمى الشبكة أو العناصر).

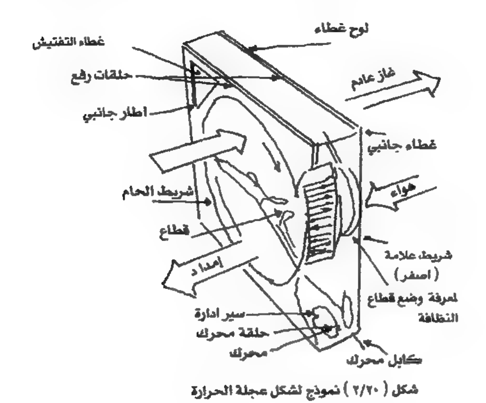
المصفوفة (matrix) تكون في اسطوانة تدور عبر الغاز العادم وتدفقات الهواء. عــند مــرور أســطح التــبادل الحراري خلال التدفق المعاكس الطبيعي للغاز العادم وتدفقات الهواء الداخل، فإن الحرارة يتم امتصاصها بانتظام وتنطلق إلى هواء الحرق بما يحافظ على استمرار دورة التجديد. دوار العجلة الحرارية، الذي يتكون من مقاطع إما من شبك الصلب أو من مواد الشعيرات الغير عضوية ذات غطاء ماص للرطوبة مــن سيراميك الزجاج، الذي يوفر مساحة سطحية كبيرة إلى تدفقات الهواء أو الغاز. هذه الطريقة المباشرة للانتقال الحراري ينتج عنها درجات حرارة أعلى للمعدن مقارنة بالمــسترجعات. انخفاض درجات حرارة الغازات الخارجة والتسخين المسبق الأعلى للهواء مع أدنى تآكل ممكن تحقيقه. طبيعي، يكون كلا من تدفقات الغاز العادم والهواء متــشابهين في الكم وسرعة الدوران يمكن أن تكون (حتى ١٠ – ٢٠ لفة في الدقيقة) متغيــرة لتوفيــر أفضل كفاءة. الانجذاب الرئيسي للمجددات الدوارة هي أنه يمكن أن تستخدم للغازات العادمة ذات درجة الحرارة المنخفضة كما أنه يمكن أن تنقل الحرارة

الكامنة بالتصميم المناسب للمنظومة (matrix). يتم توفير لحامات لخفض تسرب البخار المقاطـــع (أي دخـــول الغاز العادم في الهواء). كذلك لتجنب التلوث الذي يحدث بين التدفقين للغاز، سهولة النضح بين تدفقات الغاز النظيف والغاز الغير نظيف.

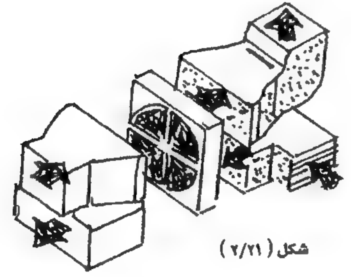
نظرا لأن تدفقات الغاز العادم وتدفقات الهواء القادم يجب أن يظلا منفصلين، لـــذلك فـــإن حجم المواسير (الرأسية أو الأفقية) وحجم العجلات (wheels) والمواسير (ducts) يتوقف على معدلات التدفق لكلا التدفقين والذي يجب طبيعا أن يكون متوازنا. أســـطح الانتقال الحراري تكون متغيرة وفي شكل طبقات خلال الدوار. كل طبقة يتم تـــصميمها لاحتواء مجموع الشواهد لأقصى استعادة للحرارة، عند أدنى تكلفة للطاقة مـــع القـــدرة علـــى اســـتمرار الأسطح النظيفة وخفض التآكل. التطوير الحديث في المجددات الدوارة تشمل منظومة دوارة أعمق لزيادة استعادة الحرارة، والطرق البارد لـــسطح الانـــتقال الحراري الذي يمكن دورانه لفترة ممتدة والسطح الجانبي الذي يتم إزالـــته. الكفـــاءة حتى ٨٠% يمكن تحقيقها لهذه التجهيزة ولكن يمكن أن تتغير كثيرا طـــبقا للحـــالات المنفـــصلة. تـــستخدم المرشحات لتنظيف الغاز العادم الحامل للغبار لاســـتمرار كفـــاءة العجلة الحرارية. استخدام الغطاء المرطب يوفر استعادة الحرارة الكامنة (مثل، استخدامات حمام السباحة) بهذا فإن الغطاء يمكن أن يقلل كثيرا الفقد في الحـــرارة الكامـــنة المـــصاحبة لتنفـــيث الهواء المشبع. التطبيقات الصناعية التقليدية للمجـــددات الدوارة تشمل استعادة الحرارة من أفران صهر المعادن والغلايات، مواقد الفـــرن العالي، نظم التنفيث...الخ. على خط أو بعيدا عن خط سطح الانتقال الحراري تمكن النظافة بدفق وغسيل الماء، تدفقات الهواء بطاقة كبيرة، ونافخات السناج بالبخار الجـــاف. مبدأ العمل بالمحدد الدوار موضح في الشكل (٢/١٩) ، نموذج لشكل العجلة الحرارية في الشكل (٢/٢٠)، وإنشاءات العجلة الحرارية في الشكل (٢/٢١).



شكل (٢/١٩) مجدد دوار



شكل (٢/٢٠) نموذج لشكل عجلة الحرارة



شكل (٢/٢١)

مقارنة المجدد مع المسترجع:

Comparison of Regenerator with Recuperator

- متطلبات المساحة الكلية والحجم الكلي للمجدد عالية جدا مقارنة بالمسترجع المكافئ.
- استخدام المجددات محدود لأفران من الصلب الضخمة (مثل فرن الجمرة المكشوفة) وأفران منتجات الكوك الثانوية بنظام وقود الحرق فقط.
- المجددات لها تكاليف رأسمالية وتكاليف صيانة أعلى.
- المجددات تحتاج إلى أعمال مدنية ضخمة.

التسخين المسبق للشحنة الصلبة لاستعادة الحرارة:

تستخدم هذه التقنية كذلك لاستعادة الحرارة من الغازات العادمة الخارجة مثل الأفران الحلقية متعددة الغرف المستخدمة في صناعات الحراريات/ السيراميك، أقطاب الكربون، الأفران الدوارة في صناعة الأسمنت، الأفران النفقية (tunnel) في صناعة السيراميك. في كل هذه الاستخدامات يتم التسخين المسبق للشحنات بالتصاق التيار المعاكس للغازات العادمة والتي بالتالي يتم تبريدها أثناء هذه العملية قبل صرفها. خلال المدخنة. هواء الحرق يتم تسخينه باستخلاص الحرارة من المنتجات الساخنة الخارجة من الفرن.

في الأفران الدوارة، تتدفق المواد التي يتم شحنها بالجانبية بسبب الميل عند طرف التغذية بينما تتدفق نواتج الحرق في الاتجاه المعاكس. بعد مرور منطقة الحرق، تتحرك المواد الصلبة الساخنة نحو طرف التفريغ ويتم تبريدها بالهواء الجوي الداخل اللازم للحرق. لذلك فإن الهواء يتم تسخينه المسبق قبل وصوله إلى منطقة الحرق النشطة.

في الفرن النفقي، تتحرك الشحنة من نهاية إلى أخرى خلال حامل ميكانيكي مناسب وتمر إلى منطقة التفاعل الساخنة. حواء الحرق يؤخذ من نهاية صرف الشحنة حيث يحدث له تسخين مسبق مع التبريد للشحنة الخارجة. في كلا الحالتين السابقتين،

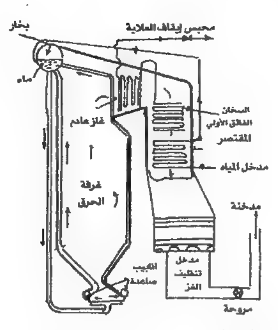
تكون الشحنات متحركة باستمرار داخل الفرن، ولكن في أفران (king) لا يوجد تحرك حقيقي للمواد الصلبة ولكن العملية يتم ضبطها خلال غرف متعددة حيث يوجد تحرك معاكس ظاهري للشحنات والهواء.

باعتـــبار الكفـــاءة الحرارية فقط لمنطقة اللهب، فإنه يكون رقم متواضع جدا، ولكن استخلاص الحرارة المفقودة من الغازات العادمة والشحنات الساخنة، فإن الكفاءة يمكن أن ترتفع إلى مستوى أعلى.

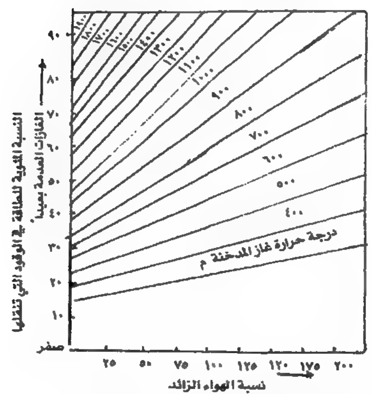
تقنيات متنوعة في استعادة الحرارة في محطات الطاقة أي التسخين المسبق لمياه التغذية للغلايات وحرق الهواء، وتحميص البخار...الخ في أفران الغلاية:

التسخين المسبق لمياه تغذية الغلاية يتم خلال المقتصد (economizer). تستخدم تجهيـزات التحميص (super heaters – التحميص للبخار عند درجات حرارة عالية) لتحمـيص الـبخار الخـارج مـن اسطوانة الغلاية بحيث يتم زيادة الطاقة الحرارية (enthalpy) للبخار مع عدم حدوث تكثيف البخار أثناء التمدد في التربينة.

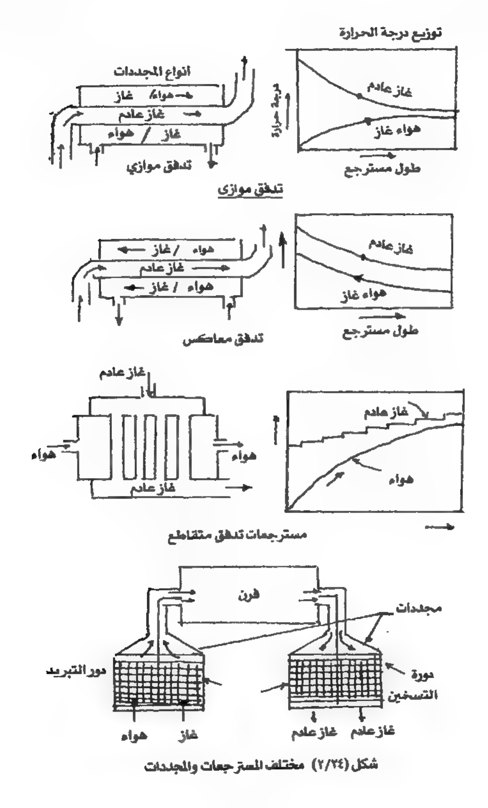
أخيرا تمر الغازات خلال لأجهزة تسخين الهواء للتسخين المسبق للهواء اللازم للحـرق، خاصة في حالة وفوق الحرق المطحون لتوفير درجة حرارة لهب مرتفعة. وهذا موضح في الشكل (٢/٢٢).



شكل (٢/٢٢) غلاية ماسورة الماء معدات أستعادة الحرارة



شكل (٢/٢٣) الحرارة المفقودة في الغازات العادمة من مدخنة الغلاية



شكل (٢/٢٤) مختلف المسترجعات والمجددات

لذلك فإنه خلال الوسائل السابقة لنظم استعادة الحرارة، فإن الكفاءات الحرارية الكلية لأفران الغلاية يمكن توصيلها إلى مستوى ٨٥ – ٩٠% أو أكثر من ذلك.

استعادة الحرارة المفقودة خلال مدخنة الغلاية باستخدام وحدة التسخين الزائد (super heater)، المقتصد (economizer)، وجهاز التسخين المسبق لهواء الحرق (air preheater) يقلل من استهلاك الوقود في الغلاية. الحرارة المفقودة في الغازات العادمة في مدخنة الغلاية عند درجة حرارة مختلفة لمختلف مستويات الهواء الزائد موضح في الشكل (٢/٢٣).

لكل ٢٢ °م خفض في درجة حرارة الغاز العادم بالمرور خلال المقتصد أو وحدة التسخين المسبق للهواء، يوجد وفر بنسبة ١% من وقود الغلاية. هذا يعني أنه لكل ٦ °م ارتفاع في درجة حرارة مياه التغذية للغلاية خلال المقتصد أو ٢٠ °م ارتفاع في درجة حرارة هواء الحرق خلال جهاز التسخين المسبق للهواء، فإنه يتم توفير ١% من الوقود. ولكن درجة حرارة غاز المدخنة العادم مع معدات استعادة الحرارة هذه (preheater, economizer, superheater) يجب ألا تقل عن نقطة الندى (dew point) وذلك لحماية طوب المدخنة، ريش المروحة الداخلية، والمواسير المعدنية الأخرى والمعدات من مخاطر التآكل.

مختلف المسترجعات والمجددات موضح في الشكل (٢/٢٤).

اقتصاديات الوقود في الأفران:

الوسائل المستخدمة للمحافظة على الحرارة أي اقتصاديات الوقود في الأفران تؤكد أداءها الاقتصادي. عمليات الفرن ذات المستويات العالية لدرجات الحرارة تكون ذات فقد حراري كبير، لذلك فإن استعادة الحرارة يجب أن تتم في هذه الحالة. الفقد الكبير يكون في الغازات العادمة والإشعاع من حوائط الفرن.

الغازات العادمة تحتوي على كل من الحرارة الملموسة (sensible heat) والحرارة الكامنة أو المختزنة (latent heat) تبخر المياه وأحيانا الحرارة الكامنة (لغازات الوقود

التـــي لـــم تحتـــرق). استعادة حرارة البخر للماء ليس عمليا ويتم التحكم في الحرارة الكامـــنة فـــي الغاز العادم بتوفير الهواء الكافي للحرق وكذلك الخلط المناسب للوقود والغاز.

الفقـــد الكلـــي في حرارة الغاز العادم يمكن خفضه إلى أدنى مستوى بتوفير الهواء الكافي للحرق فقط، ويمنع تسرب الهواء إلى الداخل (infiltration). درجة حرارة الغاز العادم يتم خفضها واستعادة الحرارة بالمبادل الحراري مثل المجددات، والمسترجعات وغلايات الحرارة العادمة.

تنسيب الوقود – الهواء (Fuel - Air Proportioning)

الإمداد بهواء الحرق يجب أن يكون أعلى من المتطلبات النظرية بقدر صغير. في الأفران المدنية، كل نقط التسرب في الأفران في نظام الفرن يتم لحامها لمنع دخول الهواء ويتم نفخ الكمية المحكمة خلال المجددات. التنسيب الدقيق الآلي للوقود والهواء يحـــسن من اقتصاديات الوقود، كفاءة الفرن والتحكم في العملية. استخدام جهاز تحليل الأكـــسجين (O_2-analyser) علـــى نـــواتج الحرق يؤدي إلى تحسين اقتصاديات الوقود والكفاءة. أحد أهم العوامل ذات التأثير على الكفاءة الجيدة للوقود هو الفقد في الشحنة، أي تلـــك النـــسبة من طاقة الوقود المنطلقة والتي تحمل خارج الفرن كحرارة ملموسة للغـــازات العادمة. العوامل الهامة التي تتحكم في هذا المعيار هي حرارة الغاز العادم الذي يترك الفرن ومحتواها من الأكسجين (المرتبط بإنتاج الهواء المستخدم في الحرق أعلى من المتطلبات المحددة والمتطابقة نظريا أي النسبة المئوية للهواء الزائد). العلاقة العامـــة بـــين النسبة المئوية للمحتوى من الأكسجين والنسبة المئوية للهواء الزائد لكلا الوقود ذو قيمة حرارية (مثل غاز الفرن العالي) والوقود الغني (مثل غاز فرن الكوك، زيـــت الوقـــود الثقيل...الخ) موضح في الشكل (٢/٢٥). العوامل التي تساهم في فقد المدخـــنة خلال قيم القدرات الحرارية للغازات العادمة (التي تشمل O_2, N_2, CO_2, CO) موضـــحة في الشكل (٢/٢٦) حيث الصفة الواضحة هي المحتوى العالي من الحرارة لثاني أكسيد الكربون (عند أي درجة حرارة معينة) أكثر من أي مكونات للغاز العادم.

بخلاف بخار الماء فإن الغازات الأخرى يكون سلوكها مماثل.

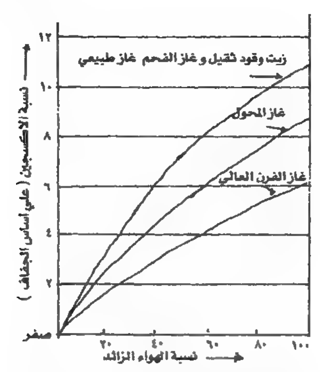
هذه البيانات مع بيانات الحرق المناسب تستخدم لحساب فقد المدخنة شكل(٢٧/٢) الذي يوضح فقد المدخنة لغاز الفرن العالي (أي وقود الغاز ذو أدنى قيمة حرارية) ولغـــاز فـــرن الكوك (الغاز الغني أي الوقود الغاز ذو قيمة حرارية عالية) أعلى من مجال درجة حرارة الغاز العادم والنسبة المئوية للهواء الزائد. وهذا يظهر بوضوح.

تأثير درجة حرارة الغاز العادم مثال حتى غاز الوقود ذو قيمة حرارية عالية، فـــإن حوالـــي ٥٠% من إمدادات الطاقة تنتهي في الغازات العادمة عند درجة حرارة حوالي ١٠٠٠ °م.

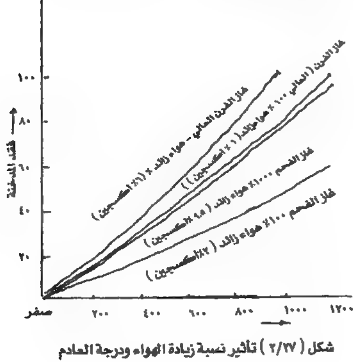
فـــي حالة الوقود الغاز ذو قيمة حرارية منخفضة، حتى مع التحكم الجيد في الحـــرق فإن معظم الإمداد بالطاقة يترك خلال المدخنة عند درجات حرارة منخفضة مثل ٦٠٠ °م.

وقـــود الغـــاز الضعيف يمكن توضيحه بحقيقة أن غاز الوقود الضعيف مع الـــتحكم الجـــيد فـــي الحرق لا يكون أفضل من غاز CO عند هواء زائد ١٠٠% (أي مستوى ضعيف جدا من التحكم في الحرق).

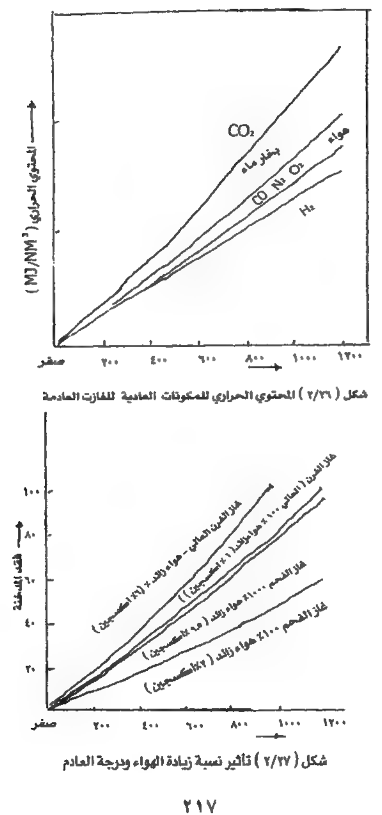
العلاقة بين فقد المدخنة لبعض غازات الوقود عند هواء زائد ١٠% (المستوى الطبيعـــي المقـــبول للتحكم في الحرق) موضح في الشكل (٢/٢٨)، والذي يظهر أن الوقود ذو القيمة الحرارية العالية يكون سلوكه بالمثل تماما.



شكل (٢/٢٥) العلاقة بين نسبة الأكسجين في الغازات العامة و الهواء الزائد

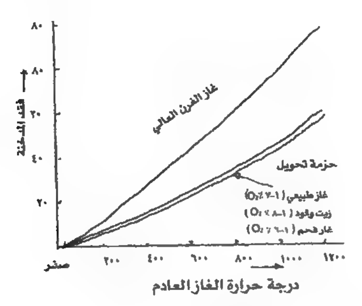


شكل (٢/٢٧) تأثير نسبة زيادة الهواء ودرجة العادم



شكل (٢/٢٦) المحتوي الحراري للمكونات العادية للغازت العادمة

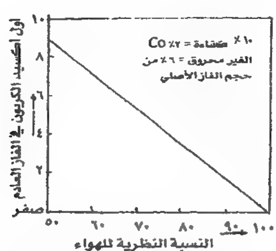
شكل (٢/٢٧) تأثير نسبة زيادة الهواء ودرجة العادم



شكل (٢/٢٨) علاقة مختلف الوقود الغاز عند هواء زائد ١٠٠%

في حالة الفقد المنخفض للمدخنة، بما يعني الاستخدام الكفء للوقود، يجب التأكيد علـى ضـمان الحرق الجيد. الشكل (٢/٢٩) يوضح تأثير استخدام الهواء الغير كافي لحرق الغاز الطبيعي. وذلك يظهر الآتي:

- ١٠% نقـص في هواء الحرق يمكن أن يسبب إنتاج المكافئ من عدم الحرق للفقد في الطاقة المنبعثة المكافئ إلى ٦% من الغاز الأصلي.
- حتى في حالة وجود الإمداد الكافي من هواء الحرق، فإن نقص في المحتوى من الأكسجين بنسبة ١% (بفرض الغاز الطبيعي المنتج للغاز العادم عند ٧٠٠ °م) سوف يؤدي إلى خفض فاقد المدخنة بنسبة ١%.



شكل (٢/٢٩) المحروق و الغير محروق في الغاز العادم للغاز الطبيعي

إثراء هواء الحرق بالأكسجين:

الهـواء يـتكون أساسا من ٢١% (بالحجم) من الأكسجين والباقي نيتروجين خامل وذلك وعند حدوث الاشتعال، يتحد الأكسجين مع الكربون ومع الهيدروجين في الوقـود ويطلـق حرارة. الغازات الخاملة للهواء تمتص الحرارة من الحرق وتحملها خـارج الفرن بما يسبب الفقد، فهي تقلل درجة حرارة اللهب بامتصاص الحرارة وبذا خفض معدل الانتقال الحراري للشحنة.

في حالة إمكانية خفض المحتوى الخامل في الهواء، فإنه يمكن الحصول على اشتعال وحرق أكثر كفاءة. يمكن عمل ذلك لإضافة الأكسجين إلى هواء الحرق. زيادة المحـتوى من الأكسجين يقلل المحتوى من المكونات الخاملة في الهواء، وبالتالي فإنه عند حرق كمية معينة من الوقود باستخدام الهواء الذي تم إثراؤه بالأكسجين، فإن حجم الغـازات العادمـة سيكون أقل من حالة استخدام الهواء العادي. في حالة عدم زيادة درجة حرارة الغاز العادم، فإن الفقد في الحرارة الملموسة في الغاز العادم سيقل بسبب الـسعة الحـرارية الأصغر للحجم الأصغر. في الأفران التي تعمل عند أحمال حرارة عالية جدا، فإن خفض الخامل ينتج عنه خفض في درجة حرارة الغاز العادم. مع نفس

المـدخلات مـن الوقود، فإن الهواء الذي تم إثراؤه للحرق يرفع درجة حرارة اللهب لوقـود معـين وبذا زيادة معدل الانتقال الحراري وزيادة معدل الإنتاج. يمكن خفض مـدخلات الوقود وذلك عند استخدام الهواء الذي تم إثراؤه بالأكسجين، لاستمرار نفس معدل الإنتاج كما تم الحصول عليه باستخدام وقود أكثر واستخدام الهواء العادي.

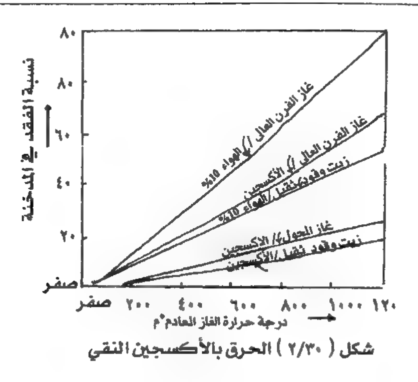
استخدام الأكسجين النقي موضح بنقص فقد المدخنة للوقود كما هو موضح في الشكل (٢/٣٠). الـنقطة الحقيقية الواضحة هي نقل الغاز ذو الطاقة الحرارية الضعيفة ليكون قـادرا على الوقود ذو الطاقة الحرارية العالية للوقود عند الحرق بالهواء البارد – هذا بـدون درجـة اللهب العالية التي تحد الاستخدام حيث الأكسجين النقي/ الوقود عالي القدرة الحرارية يمكن استخدامه.

استخدام الأكسجين لإثراء هواء الحرق أي أن هواء الحرق الثري بالأكسجين يوفـر طـريقة للحصول على مقياس في خفض فاقد المدخنة عند استخدام الأكسجين لحـرق الوقـود ذو الطاقـة الحرارية العالية مع السلبيات الفنية المصاحبة لاستخدام الأكسجين النقي.

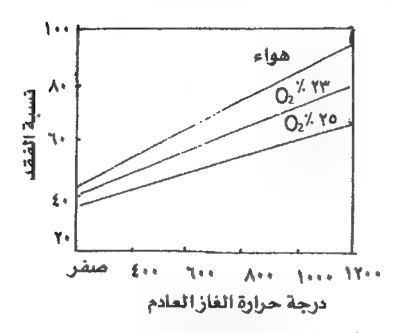
الشكل (٢/٣١) يوضح تأثيرات حرق وقود الزيت مع الإثراء بالأكسجين حتى ٢٥ % أكسجين، الذي يبين أن ١% زيادة في إثراء الأكسجين يقلل فقد المدخنة عند ١٠٠٠ °م بحوالـي ٣%. عند استخدام البخار لترزير زيت الوقود، فإنه يؤثر على استهلاك الوقود بشكل عكسي وذلك بطريقتين:

- بالحاجـة إلـى تسخين البخار المستخدم من درجة حرارة الإمداد إلى حالات العادم.
- هذا بالإضافة إلى فقد المدخنة المصاحب للوقود المطلوب لتوفير هذه الحرارة الإضافية.

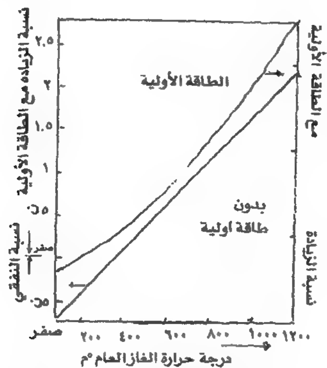
التأثير السلبي لاستخدام بخار الترزيز بمعدل ٠,٥ كجرام بخار لكل كيلوجرام زيت موضح في الشكل (٢/٣٢). هذا له تأثير صغير ولكن إيجابي على فقد المدخنة المؤثر، عادة ١% عند درجة حرارة الغاز العادم حول ١٠٠٠ °م.



شكل (٢/٣٠) الحرق بالأكسجين النقي



شكل (١/٣١) هواء الحرق الذي تم إثراؤه بالاكسجين
زيت وقود ثقيل / هواء حرق عند ١٠٠ ٪ زيادة



شكل (٢/٣٢) تأثير ترزيز البخار على خفض / زيادة متطلبات الطاقة

التحكم في ضغط الفرن: (Furnace Pressure control)

إذا كان ضغط الغازات في غرفة التسخين للفرن أقل من الضغط الجوي، فإن الهـواء الخارجي البارد سوف يتسحب إلى داخل الفرن خلال أي فتحات موجودة. إذا كـان الضغط الداخلي أعلى من ضغط الهواء الخارجي، فإن الغازات الساخنة سوف تدفع خارج الفرن خلال تلك الفتحات وإذا كان عالي سيكون بالإضافة إلى ذلك محاولة اختراق الحراريات والتسخين الزائد للفرن مسببا التلف.

لذلك، يكون المطلوب عموما أن يعمل الفرن مع قليل من الضغط الزائد قليلا في غرفة الحرق (أي ضغط الفرن أعلى قليلا عن الضغط الجوي). الضغط من القمة إلى القاع لغرفة الحرق ليس متجانسا بسبب تأثير المدخنة للغازات العادمة. لذلك فإنه يقصد بالتحكم المحافظة على الضغط المطلوب عند مستوى المجمرة . دفع الهواء إلى

الفرن الذي يعمل عند ضغط سالب يغير نسبة الوقود الهواء والتي يتم التحكم فيها آليا. فــي مثل هذه الأفران مثل تلك لإعادة التسخين أو للمعالجة الحرارية، فمثل هذا الهواء يــزيد مــن خطــورة مــشكلة الأكــسدة (الترسيبات – scaling) للشحنة بسبب وجود الأكسجين.

إذا كــان الــضغط فــي الفرن عند الضغط الجوي أو حدوث ظروف تسخين موجــبة أفضل بتطوير الانتقال الحراري وبالتحكم الجيد لتجانس درجة الحرارة. فإن الــضغط الموجب يجب أن يتم التحكم فيه لمنع خروج اللهب من فتحات الفرن وكذلك لتجــنب تــراكم الضغط الخلفي الذي يمكن أن يتداخل مع التدفق المناسب لغاز الوقود والهــواء. يــتم الــتحكم فــي ضغط الفرن بضبط الفتحات في صمام منظم التيار في المدخنة. خروج اللهب هو دلالة للضغط الموجب.

الغاز العادم المفقود مباشرة من فتحات الفرن بسبب خروج اللهب يكون عادة أكثــر ســخونة عن ذلك الخارج بالطريق العادي، دخول الهواء يخفض درجة حرارة الغاز العادم والذي يمكن أن يقلل كفاءة استعادة الحرارة. الإجراءات العلاجية لخفض خــروج اللهــب أو دخول الهواء في الفرن تشمل التحكم الجيد في ضغط الفرن، فقط أبواب الفرن والأداء الهندسي الجيد لإدارة أعمال الفرن.

العوامل المساعدة على خروج اللهب من الفرن ودخول الهواء إلى الفرن موضحة في الآتي:

- **خروج اللهب من الفرن:**
  - الضغط العالي للفرن، وخاصة عند النقطة العالية للفرن
  - أبواب الشحن المفتوحة.
  - الدفع العالي للموقد نحو أبواب الشحن.
  - الفتحات والفراغات في بناء الفرن وخاصة السقف.
- **دخول الهواء يحدث للآتي:**
  - أبواب الشحن المفتوحة للأفران التي تعمل عند ضغط سلبي (تفريغ).

- السحب العالي المصاحب للحرارة العادمة للغلايات.
- ضعف التحكم في ضغط الفرن.
- الفتحات والثقوب في بناء الفرن وخاصة عند مستوى المجمرة.
- ميول التفريغ العليا لأفران إعادة التسخين بضغط الموقد والطفو.

التحكم في درجة حرارة الفرن:

زيـــادة كمـــية زائدة من الوقود يعتبر إتلاف وينتج عنه ارتفاع درجة حرارة الغازات الخارجة وتدمير للحراريات. المعدلات العالية للوقود يعجل من معدل الانتقال الحـــراري للمادة وقد يسبب لها التلف في بعض الحالات. استخدام الوقود الغير كافي يقلل من معدل الانتقال الحراري ويطيل زمن العملية. والمعدل المناسب للوقود لحماية كـــل مـــن المادة الجاري تسخينها أو لحماية حراريات الفرن وعادة للتحكم في معدل الإنتاج أو التسخين، يتم استمراره بقياس درجة الحرارة آليا.

العزل:

مـــواد العزل متوفرة للمحافظة وترشيد استخدام الوقود، لتوفير ظروف عمل أكثـــر أمانا وراحة، لحماية المواد المعرضة للتلف بفعل الحرارة/ والضغط الحراري ولتعجيل عمل الفرن.

الفصل الثالث



الانتقال الحراري في الأفران
Heat Transfer in Furnaces

فـــي أي عملية انتقال، يكون إجمالي التدفق للمتاح بسبب تأثير القوة الدافعة. معـــدل الانتقال هو تدفق وشدة القوة الدافعة هي فرق الجهد. أساس عملية الانتقال هو أنـــه تـــوجد علاقة طولية بين التدفق والتدرج في الجهد. في جميع الحالات، عمليتي الانتقال أو حركة التدفق تحدث في اتجاه انخفاض الجهد.

في حالة الانتقال الحراري، الفرق في درجة الحرارة هو الجهد. عموما، معدل التدفق يتناســب طــرديا مــع فــرق الجهد ويتناسب عكسيا مع المقاومة ويمكن التعبير عنه بالمعادلة العامة الآتية:

$$\text{التيار} = \text{الجهد} = \frac{\text{الجهد}}{\text{المقاومة}}$$

الانتقال الحراري:

الانــتقال الحــراري يــتعامل مع معدل تبادل الحرارة بين الأجسام الساخنة والــباردة والــذي يــسمى المصدر والمستقبل على التوالي. تدفق الحرارة نحو درجة الحــرارة المخفضة، المعدل يتوقف على فرق درجة الحرارة بين المصدر والمستقبل. فـــي حالة البخر أو التكثيف يحدث الانتقال الحراري وتمتص الحرارة أو تنبعث عند

درجــة حــرارة ثابتة في جانب واحد، كما هو الحال بالنسبة لاكتساب أو فقد الطاقة الداخلية على التوالي.

عملية الانتقال الحراري:

عملية الانتقال الحراري تتعامل مع معدلات الانتقال الحراري كما تحدث في معــدة الانتقال الحراري للعمليات الهندسية. المشكلة المتعلقة بعملية الانتقال الحراري تــرجع إلى كميات الحرارة المطلوب نقلها، المعدل الذي سيتم انتقالها به بسبب طبيعة الأجــسام، القوة الدافعة، درجة التنظيم للسطح الفاصل بين المصدر والمستقبل وكمية الطاقــة الميكانيكية التي يمكن استخدامها لتسهيل الانتقال. نظرا لأن الانتقال الحراري يتضمن عملية التبادل، أي الفقد في الحرارة من جسم يساوي الحرارة المكتسبة بالآخر خلال منظومة محتجزة.

آلية الانتقال الحراري:

يــوجد ثلاث أشكال التي فيها قد تمر الحرارة من المصدر إلى المستقبل. هي التوصــيل (conduction) ، الانعكــاس (convection)، الإشعاع (radiation). في معظم التطبيقات الهندسية يحدث أكثر من واحد في نفس الوقت.

التوصيل: (Conduction)

التوصــيل هــو انتقال الحرارة خلال مادة ثابتة مثل حائط ثابت. اتجاه تدفق الحرارة يكون بزاوية قائمة بالنسبة للحائط في حالة كون السطح متساوي الحرارة وأن الجــسم مــتجانس. كمــية الحرارة المتدفقة في وحدة الزمن (dq) تتناسب طرديا مع المــساحة (A) والفــرق في درجة الحرارة (dt) وتتناسب عكسيا مع السمك (dx) عند زوايا قائمة نحو اتجاه التدفق.

المعادلة الأساسية طبقا لقانون فوريير (fourier's law):

$$dq = -KA \frac{dt}{dx}$$

حيث:

K = التوصيل الحراري للمادة.

التوصيـل الحراري في الأفران الصناعية من الأمور العادية جدا حيث تكون الفـروق فـي درجة الحرارة للأسطح الداخلية والخارجية مرتفعة إلى حد ما. حوائط الفرن تكون مصنعة من طبقات الحراريات ليتحمل درجة الحرارة العالية لنواتج حرق الغاز يليها مواد العزل لخفض الفقد الحراري نحو الوسط المحيط. طبقات الحراريات يمكـن أن تكـون بأشكال مختلفة ما بين الحوائط المستوية إلى الطبقات الأسطوانية. معـدلات الانـتقال الحراري خلال تلك الطبقات يتم حسابها بتعيين محصلة مجموع المقاومة وإجمالي الفرق في درجة الحرارة بين المصدر والوسط المحيط.

المعدلات لمختلف أشكال إنشاء حائط الفرن متعدد الطبقات هي كالآتي:

للحوائط المستوية

$$q = \frac{\Delta\, tOverall}{\frac{K_1}{K_1 A} + \frac{L_2}{K_2 A} + \frac{L_3}{K_3 A}}$$

للطبقة الأسطوانية المفرغة (q) =

$$q = \frac{\Delta tOverall}{\frac{\Delta r_1}{K_1 Al_{m1}} + \frac{\Delta r_2}{K_2 Al_{m2}} + \frac{Ar_3}{K_3 Al_{m3}}}$$

حيث:

Alml = متوسـط المـساحة اللوغاريتمـية (logmean area) للطبقات المستقلة للطبقات الداخلة وهكذا.

$$\left(\frac{A_2 - A_1}{\ln \dfrac{A_2}{A_1}}\right)$$

التحكم في جو الفرن (Control of Furnace Atmosphere)

تسخين المعادن والسبائك ومعالجتها الحرارية تتطلب ظروف خاصة للجو المحيط لتحسين الخواص الطبيعية. الجو داخل الأفران يمكن أن يكون من الأنواع الآتية (طبقا للمهام المحددة المفروض أن تقوم بها الأفران).

- جو مؤكسد (مثال. في فرن ا لغلاية).
- جو مختزل (مثال. في الفرن العالي).
- جو كربنة/ وإزالة الكربنة (مثال جو – L.D.Converter).
- جو النترجة (nitriding) (كما في حالة عملية التقسية السطحية).
- جو متعادل/ خامل (في فرن تلدين الصلب annealing).

في كثير من العمليات التي يتم فيها تسخين المادة يكون من المهم استمرار جو خاص داخــل الفرن ملتصقا بالمعدن. في الفرن الذي يتم تسخينه داخليا بواسطة الغاز، يمكن التحكم في الغاز لتوفير جو مؤكسد أو جو مختزل.

فــي بعــض الحالات تتضمن المعالجة الحرارية للمعادن المعالجة الكيميائية للطــبقات السطحية (مثال الكربنة أو النترجة – carburising and nitriding). والتي تتم في جو محكم بإتقان. في حالات أخرى، يتم التحكم في جو الفرن لمنع حدوث عدوانية على سطح المعدن (مثل، الأكسدة، ترسيبات، إزالة الكربون، أو اختراق الكبريت).

فــي بعــض الحالات يتم إنتاج جو خارجي للفرن (مثل الجو المتعادل لتلدين وتقوية الصلب يتم بالنيتروجين) والإمداد له. في تطبيقات كثيرة CO، بخار الماء تعتبر عوامل مؤكسدة (بصرف النظر عن أي أكسجين حر موجود)، وكلا من H_2O, CO هما عوامل اختزال. النيتروجين يوفر جو خامل.

الجو المؤكسد:

في أفران التسخين عند درجة الحرارة المنخفضة (أقل من ٧٠٠ °م) فإن الجو المؤكسد لا يسبب كثيرا من تكون مادة القشور (scaling) بسبب وجود الأكسجين الحر فـي الغـاز العادم. إذا كان الجو مؤكسدا عندئذ يستخدم قليلا من الهواء الزائد لإكمال الاحتـراق وتوفير الجو المطلوب. في فرن الاشتعال بغاز الفحم عادة يتم ضبط نسبة ١٠,٥% CO_2، ١,٥% O_2 في الغاز العادم والذي يوفر جو مؤكسد معتدل.

الجو المختزل:

وجـود CO، H_2 وعـدم وجـود O_2 في الغاز العادم من الفرن هو دلالة للجو المختـزل فـي الفـرن. عند إعادة ظروف الفرن لتكون مختزلة (كما في حالة تقسية الـصلب) فـإن التحكم في الهواء الأولي والثانئي يتم تنظيمها مع مثبط العادم لإعطاء سـتارة مـن اللهب عند فتح باب الفرن. قطعة من الورق عند إلقائها في الفرن سوف تتفحم ولكن لا تشتعل. هذا الاختبار العملي يبين عدم وجود الأكسجين ولكنه لا يعطي أي بـيان عـن كمية CO الموجودة. تحليل الغاز سوف يبين حوالي ١ – ٢% CO في الغازات العادمة طبقا للعملية. الجو المختزل في الفرن يتم توفيره بضبط كمية الهواء الثانـي بحيث أن كمية صغيرة من CO تكون موجودة في غازات الفرن. الجسيمات الكربونية مثل الدخان لا تسبب وجود جو مختزل في الفرن.

جو الكربنة:

غازات الهيدروكربونات تحدث كربنة لسطح الصلب عند درجة حرارة التلدين.

جو إزالة الكربنة:

وهـذا يـشمل إزالة الكربون من كربيد الحديد (Fe_3C) وبذا التأثير على البناء البللوري للصلب. CO_2 يزيل كربنة الصلب، بينما CO يسبب الكربنة.

$$Fe_3C + CO_2 \rightarrow 3Fe + 2CO$$

الهيدروجين كذلك يزيل الكربون عند درجة الحرارة العالية (عند تكون الميثان).

$$Fe_3 + 2H_2 \rightarrow 3Fe + CH_4$$

لـذلك، فـإن إضافة CH_4 إلى الجو يقلل إزالة الكربون بالهيدروجين. النيتروجين في وجـود البخار يزيل الكربون من الصلب عالي الكربون. في عدم وجود البخار، يكون خاملا.

جو النترجة:

النيتروجين النشط المتكون بتكسير الأمونيا عند سطح المعدن يسبب تكون النيتريد مع زيادة صلابة السطح.

الجو المتعادل:

فـي حالـة الـتلدين لغطاء لفـات الصلـب يستخـدم غـاز متعـادل/ خـام للحمـاية (٩٥% N_2 + ٥% H_2)، بحيث، لا يمكن تحمل جو الأكسدة أو الاختزال للفات الصلب.

التسخين الخارجي للأفران:

فـي أفـران الـتلدين اللامـع، يلزم جو محكم للحصول على الخواص الطبيعية المطلوبة للمعادن، وذلك بعدم حدوث قشور، إزالة الكربون وتفاعلات كيميائية أخرى (عادة بسبب الكبريت أو الأكسجين الذي يتلف سطح المعدن). يتم ذلك في أفران ذات التـسخين الخارجـي حيث أن التحكم الضروري في الفرن لا يمكن تحقيقه في حالة دوران غـازات الحـرق في الفرن. يتم تسخين الفرن بطريقة غير مباشرة والغازات المكونة لجو الفرن يتم إنتاجها منفصلا.

الفصل الرابع



تقسيم الأفران

تنقسم الأفران من وجهات النظر المختلفة وذلك لمعرفة الأنواع التي تمثل الأفران الصناعية المختلفة والتي تشمل أساسا أجزاء رئيسية ثلاث:

- المكان الذي يتم فيه الحرق.
- غرفة العمل للفرن حيث يتم انتقال الحرارة من نواتج الحرق إلى المواد تحت التسخين وتجهيزات إزالة الغازات العادمة.

تقسيم الأفران المبني على عوامل مختلفة هو كالآتي:

المبني على مصدر الحرارة:

- أفران الحرق/ اللهب: وهذه الأفران حيث الحرارة نتيجة حرق الوقود.
- الأفـــران الحـــرارية – الكهربية: في هذه الأفران يتم توليد الحرارة بواسطة الكهرباء.

المبني على نوع الوقود المستخدم:

- أفران حرق الوقود الصلب.
- أفران حرق الوقود السائل.
- أفران حرق الوقود الغاز.

- أفـــران ذات الحرق المختلط – هنا يحدث الحرق لنوعين أو أكثر من الوقود حيث يتم الاستخدام في نفس الوقت.

المبني على طرق الانتقال الحراري من الوقود للشحنة تحت التسخين:

- الأفران حيث الوصول على اتصال مباشر بالمادة تحت التسخين – مثال أفران صناعة الذهب وأفران الحداد ذات اللهب المفتوح.
- الأفـــران التـــي يتم فيها تسخين الشحنة بنواتج الحرق، مثال أفران المعالجة الحرارية.
- الأفـــران التـــي يتم فيها تسخين المادة بطريقة الانتقال الحراري خلال حائط صلب مثال أفران الغلاية.
- الأفـــران التي يحدث فيها انتقال الحرارة خلال المجال السائل المحيطة للمادة المغمورة تحت التسخين مثال أفران حمام الملح أو أفران حمام الرصاص.

المبني على أجهزة الحفاظ على الحرارة:

- أفـــران الاســـترجاع: هـــنا الغـــاز العادم والهواء يدور في مسارات متغيرة والحرارة الممتصة بحوائط المسارات من الغاز العادم الساخن التي تؤخذ بعيدا بالماء البارد.
- أفـــران الـــتجديد: هنا، يتم مرور الغاز العادم خلال غرف ترابيع من الطوب بالتـــبادل بعـــد فتـــرة زمنية محددة. الهواء البارد أو الغاز المار فوق ترابيع الطـــوب يأخذ جزء من الحرارة المتراكمة بواسطة ترابيع الطوب والحرارة والأخير يبدأ ثانيا في امتصاص الحرارة من الغاز العادم.

المبني على نظام الشحن:

- أفران الشحن اليدوي.
- أفران الشحن الميكانيكي.

المبني على نظام العمل:

- أفران الدفعة الواحدة (batch) مثال فرن الدست (cupola).
- الأفــران التـــي تعمـــل من آن إلى آخر (periodic) مثل أفران التلدين، أفران الكوك....الخ.
- الأفران المستمرة مثل فرن حوض الزجاج، فرن إعادة التسخين...الخ.

المبني على السحب (Draught)

- أفران السحب الطبيعي/ الذاتي: تعمل بمدخنة أو بأبواب مفتوحة.
- أفــران السحب عنوة: هنا يستخدم مراوح السحب عنوة للإمداد بهواء الحرق وكذلك لإزالة الغاز. هذا عادة يعمل عند ضغط موجب.
- فرن السحب الحثي (Induced Draught): في هذا الفرن حيث مروحة السحب تكون موضوعة عند قاع سحب المدخنة لسحب الغاز العادم إلى خارج الفرن – بحيث تكون عند ضغط سلبي (تفريغ).
- فــرن السحب المتوازن (balanced draught): في هذا الفرن يتم توفير كلا من مــروحة السحب عنوة للإمداد بهواء الحرق ومروحة ا لسحب الحثي لسحب الغاز العادم إلى الخارج.

المبني على كل الفرن:

- فرن البوتقة (crucible)
- فرن عالي (blast)
- فرن المجمرة (hearth)

المبني على الغرض:

- الصهر.
- التحميص (roasting)
- إعادة التسخين.

مبني على الطريقة التي يتم بها تداول الشحنة:

- فرن قائم (shaft) [ذو حوض يشحن من أعلى ويفرغ من أسفل]
- فرن نفقي Tunnel
- فرن لافح (للإحماء الخارجي) muffle
- فرن دافع – مروحة خلفية دافعة pusher
- فرن حمام – ثابت/ مائل/ دوار.

مبني على الصناعة المستخدمة للفرن:

أ- فرن إعادة تسخين الصلب: فرن الحرق الغاز للتسخين المستمر للكتلة الحديدية

- نوع الدفع (pusher)
- نوع حفرة السقي
- نوع كمرة السير (walking beam)

ب- إنتاج - الحديد الخام - الفرن العالي.

جـ- إنتاج حديد صلب عقدي (عالي المطيلية) (nodules

- في أفران دوارة

د- صناعة مسبوكات الحديد - فرن الدست المقيد (cupola)

هـ- الصناعية الكيميائية:

- أنبوبة التقطير بالأشعة radiant pipe still
- فرن البوتقة أو القدر pot furnace

و- مصهورا صغيرة للحديد والصلب – فرن البوتقة بحرق الكوك.

ز- أفران تصنيع الصلب:

- الجمرة المفتوحة open hearth
- فرن الأكسجين القاعدي.
- محول بسمر

ح- المعالجة الحرارية للصلب:

- فرن التجديد المنعكس من نوع bogie
- فرن تقوية شرائط الصلب.

ط- فرن الطوب الحراري:

- فرن خلية النحل بالحرق بالفحم لحرق الحراريات.
- أتون الطوب المستمر (أتون – kiln) لتجفيف الطوب.

ي- المعادن الغير حديدية:

- الفرن الدوار المائل بإشعال الزيت.
- الفرن العاكس (reverbaratory)
- فرن الصهر الدوار الصغير للنحاس الأصفر (brass)
- الفرن الدوار المائل بإشعال الزيت.
- فرن البوتقة المائل بإشعال الزيت.

ك- حرق الأسمنت والجير:

- الأتون الدوار بالتدفق المعاكس والإشعال بالوقود المطحون.
- الأتون القائم (يشحن من أعلى ويفرغ من أسفل) باللهب المباشر.

صهر الزجاج:

- حمام التجديد بالحرق بالغاز (regenerative bath)
- فرن البوتقة – زيت/ غاز الإنتاج والإشعال بالإحماء الخارجي (muffle) بالاسترجاع أو بالتجديد (recuperative/ regenerative).

رفع البخار: (Steam Raising)

- فرن البوابة الثابتة أو البوابة المتحركة – الإشعال في الغلاية.
- أفران حرق الفحم المطحون.
- الإشعال الرأسي.
- الإشعال المماس.

- أفران الطبقة السائلة.
- أفران حلزونية.

الكربنة: (Carbonisation)

- صـــناعة الغـــاز – أفقـــي – فرن عاكس يحرق للغاز – فرن عاكس يحرق الغاز متقطع.
- رأسي مستمر – حرق الغاز عاكس بالتدفق المعاكس.
- فرن خلية النحل.
- فرن المنتج الثانوي.
  - نوع المجدد.
  - نوع الحرارة المفقودة.
- الفرن المجدد، الدوار، ذو العادم المزدوج، المركبة.

لا يــوجد تصنيف واحد مناسب للفرن حيث يمكن أن يكون فرنين متشابهين بالنسبة لعملية واحدة ولكنهما غير متشابهين تماما من وجهة نظر عملية أخرى. فمثلا، كـــلا نوعي فرن النحاس الأصفر (brass) يشبها فرن المجمر المكشوفة بالنسبة لعملية الانتقال الحراري من الفرن إلى الشحنة ولكنهما غير متماثلين من وجهة نظر الإشعال. لـــذلك فإن تقسيم الفرن لا يفيد كما يفيد التقسيم للعمليات التي تحدث في للفرن. التقسيم الكبير للأفران موضح في الشكل الآتي:

جدول ( ) التقسيم العام للأفران

- الأفران
  - اللهب المباشر
    - مستمر
      - حركة لولبية
        - اسطوانة
        - دوارة
      - كرة دائرية
        - مجمرة دوارة
        - منطقة دوران
      - حركة مستقيمة
        - الدافع
        - المحول
        - الدرفلة
        - الهزاز
        - كمرة المشي
        - الناقل العلوي
        - فرن بيرجي
        - الناقل الذاتي
        - البرجي
    - متقطع
      - محرق
      - غطاء محمول
      - فرن برجي
      - الشرق
      - فرن عاكس
  - اللهب الغير مباشر
    - مستمر
      - البوتقة
      - الحمام
      - الأنبوب المشع
      - الملكن
        - الدافع
        - المحول
        - المجمرة الغلاية
        - فرن برجي
        - المحول الذاتي
        - الدوار
    - متقطع
  - تصنيف خاص
    - المقاومة
    - الحث
    - الميكروويف
    - فرن المموجة
    - فرن القوس الكهربي
    - الفرن العالي

الفصل الخامس

5

حسابات الميزان الحراري للفرن

Furnace Heat Balance Calculations

الميزان الحراري للأفران هو طريقة لتعيين الكفاءة الحرارية للعملية ومقارنة القيم النسبية لفقد الحرارة، وذلك بالمقارنة بعملية متشابهة معروفة. مساحات عدم الكفاءة يمكن التعرف عليها حيث يمكن حدوث تغير في المعدة أو التحكم في العملية أن ينتج عنه تحسن في الكفاءة.

يمكن عمل الميزان الحراري على عملية، أو جزء من عملية أو على من العمليات حيث يجب اتزان الكتل (عدا في حالة عملية الانقسام/ الاندماج النووي)، والطاقة/ الحرارة التي يتم الإمداد بها يجب أن تساوي لتلك المستخدمة أو المصدرة. درجة الدقة التي بها تتطابق بها كل بنود المدخلات مع كل بنود المخرجات تعكس الدقة التي بها يتم حساب الميزان. نسبة الحرارة التي لا يتم حسابها يجب أن تكون أقل من ٥% من الكلي في الميزان الحراري الجيد.

معيار درجة الحرارة التي هي عادة من صفر إلى ١٥ °م يلزم تثبيته للميزان الحراري الذي يتم حساب الحرارة المحسوسة بالإشارة إليه. كل بنود المدخلات والمخرجات في الميزان الحراري يجب أن يعبر عنه بنظام ثابت من الوحدات الحرارية. أحياناً، كان الميزان الحراري يتم بالإشارة إلى وحدة الكم للآتي:

- المادة الخام.

- المنتج الرئيسي.
- الوقت.
- الوقود القياسي بقيمة حرارية ثابتة.

بنود المدخلات الحرارية في الميزان الحراري:

يمكن أن تحتوي على أو من أو كل البنود الآتية:

- التسخين المسبق في هواء الحرق.
- الطاقة الحرارية في الوقود.
- الحرارة المحسوسة/ التسخين المسبق في الوقود.
- الحرارة الناتجة عن التفاعل.
- الحرارة الملموسة أو الحرارة المسبقة في المواد الخام.
- الحرارة الكلية للبخار مثل البخار المستخدم لترزيز الوقود السائل.
- الحـــرارة المكافـــئة لأشـــكال أخرى من الطاقة مثل الطاقة الكهربية للتسخين، قوة الطلمبة أو المروحة....الخ.

بنود مخرجات الحرارة في الميزان الحراري:

البنود المختلفة للحرارة الخارجة قد تشمل أي أو كل من:

- الحرارة الملموسة + الحرارة الكامنة مثال إجمالي الحرارة في المنتج.
- الحرارة الممتصة في التفاعل الكيميائي.
- الحرارة الكلية في الغاز الخامل:

  أ- الطاقة الحرارية لأي غاز موجود قابل للاحتراق.

  ب- الحرارة الملموسة للغازات.
- الحرارة الملموسة المنقولة إلى مياه التبريد.
- الحرارة الملموسة المختزنة في منشأ الفرن إذا بدء الفرن من حالات باردة.

- الحـــرارة الملموســـة فـــي معـــدة الـــنقل مـــثل الصواني، السلاسل، ألواح التحميل...الخ المستخدمة في شحن وتفريغ الفرن.
- الحرارة الكلية في أي متبقي في الحريق:

أ- الحـــرارة الكامنة في الكربون الذي لم يحترق في الرماد، السناج، القار...الخ.

ب- الحرارة الملموسة في الرماد وفي التكتلات (الكلنكر).

جـ- الحرارة الكلية في الخبث المنصهر.

- الفقد الإنشائي في الحرارة:

أ- التوصيل خلال المجمرة.

ب- التوصـــيل خلال الحوائط والأسقف، المكافئ إلى الانعكاس والإشعاع من السطح الخارجي للفرن.

- الـــرقم الغيـــر محسوب بحساب الفرق بين بنود المدخلات الكلي ناقص بنود المخرجات، يجب أن يقل عن ٥% من بنود الكلية للمدخلات.

بنود ا لحرارة المطلوبة/ المستخدمة في الميزان الحراري:

الحرارة الملموسة: (Sensible Heat)

الحـــرارة الملموســـة هي الحرارة التي تعلو درجة حرارة (القياس) (datum) الموجودة في المادة المأخوذة من العملية وتساوي كمية متوسط ارتفاع درجة الحرارة أعلى من القياس.

الحرارة النوعية: (Specific Heat)

الحـــرارة النوعية هي الحرارة الكامنة في وحدة الكتلة/ الحجم للمادة الصلبة، السائلة، الغازية عند ارتفاع درجة حرارتها بدرجة مئوية واحدة. خلال مجال كبير من درجة الحرارة، القيمة المتوسطة يمكن استخدامها، ذلك لأن الحرارة النوعية هي بدلالة درجة الحرارة.

الحرارة الكامنـة: (Latent Heat)

الحــرارة الكامنة هي كمية الحرارة التي تنطلق أو تمتص عند درجة حرارة ثابتة عند تغير المجال، مثال: من الحالة الصلبة إلى السائلة، ومن السائلة إلى الغازية أو من أحد حالات التبلر إلى الأخرى والعكس.

الحرارة (الطاقة) الكلية:

وهذه مجموع الطاقة (الحرارة) المحسوسة والمختزنة (الكامنة) عادة على أساس وحدة الوزن. الطاقة الكلية للبخار مثلا تشمل:

- الحرارة المحسوسة من صفر درجة مئوية إلى درجة حرارة الغليان.
- الحرارة الكامنة عند نقطة الغليان.
- الحرارة المحسوسة للبخار بعد نقطة الغليان.

الجهد الحراري (القدرة الحرارية): (Potential Heat)

الجهد الحراري هو القيمة الحرارية للوقود أو المادة التي لم تحترق التي يمكن أن تنطلق عند الحرق وتساوي الكمية × القيمة الحرارية (الكلية/ الصافية).

حرارة التفاعل: (Heat of Reaction)

حرارة التفاعل هي الحرارة لأي تفاعل كيميائي (أو الطاقة الكلية إذا كان أكثر مــن تفاعـل) يحــدث في العملية. حرارات التفاعل يمكن تقديرها طبقا لكميات مواد التفاعل التي سوف تعطي الوزن الجزيئي بالآتي: كجرام/ جرامات/ أرطال من المنتج الرئيـسي. يجــب استخدام نظام ثابت للوحدات. التفاعلات القياسية تقدر عند ٢٥ °م ويمكن تطويرها بقانون هيس (Hess law) إلى حالات أخرى.

المكافئ الحراري: (Heat Equivalent)

المكافئ الحراري للبخار، الطاقة الكهربية، الهواء المضغوط أو أي مصدر ميكانيكي آخر يتم توفيره للمراوح/ الطلمبات لتدوير، لتغذية أو لسحب المواد وللمعدات الثانوية الأخرى يجب أن يكون ضمن الميزان الحراري.

الفترة الزمنية للميزان الحراري: (Period of Heat Palance)

لعمل الميزان الحراري المكافئ، فإن ظروف نهاية فترة عمل الملاحظة يجب أن تكون نفسها لتلك عند البداية ولكن ليست طويلة جدا بحيث يؤخذ في الحساب الأداء لمدة طويلة مثال بسبب بري حوائط الفرن.

الأسلوب العادي هو كالآتي:

١. **العمليات الدورية (Cyclic):**

فـــي العمليات التي تحدث دوريا، تبدأ الملاحظات وتنتهي عند نقاط مقابلة في الدورة. مثال من صنبور إلى الصنبور التالي.

٢. **العمليات بالدفعة الواحدة (Patch):**

الملاحظات خلال عملية الدفعة الواحدة أو العمليات.

٣. **العمليات المستمرة:**

الملاحظة بعد أن تستقر الظروف وتستمر لمدة طويلة كافية حيث تهمل التغيرات الصغيرة. الظروف يجب المحافظة على استمرارها عند عمل الملاحظة.

القياسات في الميزان الحراري:

القياســات المباشــرة للكــتلة يجب عملها كلما أمكن ذلك. التغير الصافي في الشحنة يتم تقديره. أحجام الزيت، البخار، غازات الهواء. الخ يتم قياسها معا بالضغط المناســب ودرجة الحرارة المناسبة لكل المواد الداخلة والمواد الخارجة ويتم التسجيل أثــناء فتــرة الملاحظــة . البــيانات الطبيعــية تكون مطلوبة لحساب الجهد المنفرد (individual) الحــرارة المحــسوسة، الحرارة الكامنة. التحليل الكيميائي للوقود، مواد الــتفاعل الأخــرى والغازات العادمة تكون كلها مطلوبة مع القيمة الحرارية للوقود. حرارة التفاعلات الكيميائية متاحة في الجداول، كما يمكن تعيين القيمة الحرارية للوقود مباشرة.

حساب الميزان الحراري للمبادل الحراري:

مثال:

فــرن تجديــد يستهلك هواء بمعدل ١٢٧٥٠ متر مكعب/ الساعة عند درجة حــرارة دخــول ثابتة ٢٠ °م. يدخل الهواء المجدد المحتوي على ٥٠ طن من الملء الحراري بمتوسط حرارة نوعية ٠,٢٤٧ كيلو سعر حراري/ كجرام ٥ م، خلال نصف دورة ذات ٢٠ دقيقة وخلال نصف الدورة الآخر ١٤٢٠٠ م^{3}/ الساعة من دخول الغاز العادم عند درجة حرارة ثابتة ١٢٢٠ °م ويتركه عند متوسط درجة حرارة ٧٠٠ °م . احسب درجة الحرارة المتوسطة للهواء الذي يترك المجدد وكذلك متوسط الارتفاع في درجة حرارة شبكة الطوب أثناء دورة التسخين. بفرض أن ٩٥% من الحرارة المتاحة تصل إلى المجدد.

متوسط الحرارة النوعية للهواء والغازات العادمة هو ٠,٣١٧ ، ٠,٢٣٢ كيلو سعر حراري/ م^{3} على التوالي.

الحل:

الحرارة المتاحة في المجدد

٠,٩٥ × الحجم × الحرارة النوعية × الخفض في درجة الحرارة =

٠,٩٥ × ١٤٢٠٠ × ٠,٣٣٢ × (١٢٢٠ – ٢٠) = ٥٣٧٤٤١٦ كـيلو سعر حراري/ الساعة

الحرارة العادمة المفقودة = ١٤٢٠٠ × ٠,٣٣٢ × (٧٠٠ – ٢٠) =

= ٣٢٠٥٧٩٢ كيلو سعر حراري/ الساعة

الحرارة التي تم تخزينها في المجدد

= ٥٣٧٤٤١٦ – ٣٢٠٥٧٩٢ = الكتلة × الحرارة النوعية × الارتفاع في درجة الحرارة أو

٢١٦٨٦٢٤ = ٥٠٠٠٠ × ٠,٢٤٧ × الارتفاع في درجة حرارة الطوب الحراري

لذلك

الارتفاع في درجة الحرارة = $\frac{٢١٦٨٦٢٤}{٥٠٠٠٠ \times ٠,٢٤٧}$ = ١٧٥,٦ °م

الحرارة المخزنة في المولد = ٥٣٧٤٤١٦ – ٣٢٠٥٧٩٢

= الحرارة التي خرجت بالهواء

أو

١٢٧٥٠ × ٠,٣١٧ × (T – ٢٠) = ٢١٦٨٦٢٤

حيث

T = درجة حرارة الهواء الخارج من المجدد

T = $\frac{٢١٦٨٦٢٤}{١٢٧٥٠ \times ٠,٣١٧}$ + ٢٠ = ٥٥٦,٥

لذلك، فإن درجة حرارة الهواء الخارج تكون ٥٥٦,٥ °م بينما الارتفاع في درجة حرارة الطوب الحراري أثناء دورة الحرق = ١٧٥,٦ °م.

الباب الثالث



الحــراريات
Refractories

•• محتويات الباب :

الفصل الأول



الحراريات Refractories

١- مقدمة :

الحـــراريات هي تلك المواد التي تتحمل درجات الحرارة العالية ولا تنصهر مـثــل الطفــــل الحــــراري (fireclay)، الـــسيليكــا، الكـــروميت، المجنـــزيت (chromite, magnesite)......الخ.

تصنف أنواع المواد الحرارية طبقا لطبيعتها الكيماوية كالآتي:

نوع المادة الحرارية	أمثلة	ملاحظات
الحراريات الحامضية (المكون الرئيسي هو السيليكا	الطفل الحراري، السيليكا، الكوارتز، الرمل الحراري (ganister sand)	يجب ملاحظة تجنب التصاقها بالمنتجات الحامضية لتجنب حدوث التفاعلات
الحراريات القاعدية وهذه تتكون من أكسيد قاعدي بدون وجود سيليكا حرة	البوكسيت، الجير المطفي، المجانيزيت (magnesite)، الدولوميت، الألومنيا، الزركونيا. لا يستخدم الجير المطفي (lime) كمادة حرارية نظرا لشراهته للماء.	يجب ملاحظة تجنب التصاقها بالمنتجات الحامضية لتجنب حدوث التفاعلات
الحراريات المتعادلة	الكروميت، الكربون الجرافيتي المقاوم	يمكن استخدامه

ملاحظات	أمثلة	نوع المادة الحرارية
بالاتصال مع المنتجات الحامضية أو القلوية	للحرارة، الكربيد، mullite، kyanite	

كذلك يمكن تقسيم الحراريات على أساس المقاومة الحرارية كالآتي:

نوع الحراريات	قيمة القمع الحراري (قمع سيجر)	القدرة الحرارية/ درجة حرارة الانصهار °م
الحراريات ذات القدرة المنخفضة	١٩ – ٢٨	١٥٢٠ – ١٦٣٠
الحراريات ذات القدرة المتوسطة	٢٨ – ٣٠	١٦٣٠ – ١٦٧٠
الحراريات ذات القدرة العالية	٣٠ – ٣٣	١٦٧ – ١٧٣٠
الحراريات الفائقة القدرة	أكثر من ٣٣	أكثر من ١٧٣٠

ملحوظة: قيمة القمع الحراري (قمع سيجر) (Siger cone) لقياس درجات الحرارة أعلى من ٥٠٠ °م.

٢- الخواص:

الخواص الهامة للحراريات هي مقاومة درجة الحرارة العالية، الأحمال الثقيلة، المواد المساعدة في انخفاض درجة حرارة الانصهار (fluxes)، السوائل العدوانية مثل الخبث (slag)، الصدمات الحرارية الناتجة عن التغير السريع في درجات الحرارة والذي يسمى (spalling resistance) أي مقاومة التقشر...الخ. الخواص الأخرى هي القوة، الكثافة، التوصيل الحراري والكهربي...الخ وهي:

أ- المسامية ونفاذية الخبث (Porosity and Slag Permeability):

زيادة المسامية للحراريات تزيد من حساسيتها للتفاعل والعدوانية الكيماوية بفعل الغازات والخبث المنصهر...الخ. عند خفض المسامية، فإن القوة تزداد والتوصيل الحراري يزداد ولكن مقاومة الصدمات الحرارية (spalling resistance) تنخفض بسبب انخفاض معظم الفراغ لامتصاص التمدد والانكماش.

ب- المقاومة الحرارية أو نقطة الانصهار (refractoriness or Fusion point)

وهي درجة الحرارة التي عندها تنصهر المادة الحرارية. يجب أن تكون أعلى مـن درجة حرارة الاستخدام للحراريات. نقطة الانصهار تنخفض عندما تكون المادة الحرارية تحت أحمال (refractories under load).

جـ - القوة Strength

القـوة هي مقاومة الحرارية لأحمال الضغط ولإجهادات الشد والقص. تعتبر المقاومـة الحرارية تحت الأحمال هامة ذلك لأن بعض الحراريات تنهار عند درجات حـرارة منخفضة عند تعرضها للأحمال. في الأفران العالية يجب على الحراريات أن تتحمل الحمل العالي، لذلك فإن القوة تحت التأثير المشترك للقوة والحرارة تعتبر هامة.

د- الوزن النوعي (Specific Gravity)

يجب أن يكون الوزن النوعي منخفضا للحصول على أكبر عدد من الطوبات لوحدة الوزن. كذلك فإن الطوب الخفيف في الجزئ السفلي من المنشأ العالي لا تكون معرضة للأحمال الثقيلة. التكلفة السعرية للطوب بالوزن النوعي العالي أكثر من ذلك بالوزن النوعي المنخفض (بفرض أن سعر الخام هو نفسه).

هـ- التقشف والتشقق (Spalling)

وهو تقشف الحراريات بسبب التمدد الغير متجانس بسبب الحرارة وذلك عند التعـرض للتسخين السريع والتبريد. لخفض التشقق فإن الحراريات يجب حرقها جيدا ومساميتها يجب أن تزداد.

التوصيل الحراري:

كـتل الأفـران العاديـة يجـب أن يكون لها توصيل حراري منخفض ولكن الحـراريات المـستخدمة في أفران الكوك، المولدات، الأفران اللافحة (أفران الإحماء الخارجي muffle furnaces) يجب أن يكون لها توصيل حراري عالي. يزداد التوصيل الحراري مع انخفاض المسامية في الطوب الحراري أي عند انخفاض الهواء المحجوز

في الحراريات. طوب العزل الحراري (له توصيل حراري منخفض) تظل عند درجة الحرارة العالية ولذلك يكون عمر استخدامها قصير.

التوصيل الكهربي:

فـــي الأفـــران الكهـــربية يجـــب أن يكون التوصيل الكهربي للمادة الحرارية مـــنخفض. عـــدا، الجـــرافيت فكل الحراريات الأخرى ذات توصيل كهربي رديء. المقاومة الكهربية للحراريات تنخفض بسرعة مع ارتفاع درجة الحرارة.

التركيب الكيماوي:

يجـــب أن يكون التركيب الكيماوي للمادة الحرارية أن المجالات المحيطة لا تتفاعل مع الحراريات وتحدث بها تآكل. يجب عدم استخدام الحراريات الحامضية في أفران تسخين مادة قاعدية وإلا فإن الطوب سوف يتفاعل مع مكونات الفرن ويحدث به تآكل بما يقلل من عمره الافتراضي.

٢- الطرق العامة لصناعة الحراريات:

صناعة الحراريات تتكون من العمليات الآتية:

الطحن Grinding

يـــتم طحن المواد الخام للوصول إلى حجم الحبيبات المناسب. يجب أن النسبة بـــين الحبيبات الخشنة والناعمة، هذه النسبة يتم المحافظة عليها ٥٥ : ٤٥ . المعدات المـــستخدمة لهذا الغرض ذات أنواع مختلفة من الكسارات، الطواحين، معدات الطحن بالطرق، الطحن بكرات الطحن، مناضد الاهتزاز، المصافي....الخ.

المعالجة المسبقة:

المعالجة المسبقة الرئيسية للحراريات الخام هو الحرق/ التحميص عند درجة حـــرارة عالـــية، لمـــدة زمنية طويلة التي تحقق التحول الكامل للمادة وبالتالي ثباتها. مكـــونات المادة الحرارية المشطبة المنتجة بالتفاعل بين الحبيبات الصلبة للمواد الخام نـــادرا مـــا تكون في حالة اتزان تام ذلك لأنه نادرا ما يكون صهر وسبك هذه المواد

الحرارية مجديا. السيليكا الطبيعية تحتوي أساسا الكوارتز والذي لا يكون مستقرا عند درجات الحرارة العالية وتحدث لها تحولات كبيرة في الحجم. الكوارتز (الشكل الثابت للسيليكا حتى ٨٧٠ °م يتحول إلى tridy mite) عند التسخين لمدة طويلة عند درجة الحرارة هذه أي ٨٧٠ °م. الحرق لمدة زمنية أقل عند درجة حرارة ما بين ٨٧٠ ° و ١٤٧٠ °م ينتج عنه تحول الكوارتز إلى (tridy mite). وعند التسخين أعلى من ١٤٧٠ °م فإن هاذ يتحول إلى (cristobalite). تحول الكوارتز إلى (tridy mite) ينتج عنه ١٦% زيادة في الحجم بينما تحول (tridy mite) إلى (cristobalite) يسبب حدوث نقص وانكماش قليل في الحجم. لذلك فإن السيليكا الخام تتمدد كثيرا عند التسخين إلى درجات الحرارة العالية ويصبح الثبات الممبق للسيليكا ضروري.

وبالمثل، الطفل الحراري الذي يتكون من المواد المعدنية المختلفة سيليكات الألومنيوم المائية (hydrous alumino-silicate) ، يتفتت إلى مكونات عديدة عند التسخين. وهذه المكونات تميل إلى تكوين الموليت الثابت ($3Al_2O_3$. $2SiO_2$). تكون الموليت يبدأ عند ١٠٠٠ °م ويزداد سريعا مع زيادة درجة الحرارة. القوة العالية عند درجة الحرارة المرتفعة، ومقاومة التفاعل مع الخبث والخواص المفيدة الأخرى للطوب الحراري تتوقف على تكون الموليت وخواص الأربطة الزجاجية (glassy bonds). حتى أن عوامل التعرية لخليط الطفل الحراري تزيد من قوة مرونته (plasticity).

الماجينزيت (magnesite) يتم حرقه جيدا للتخلص من CO_2 وتحويله إلى الماجنيزيا البللورية الثابتة (MgO) المعروفة باسم (periclase) وتتضمن أدنى انكماش في الأشكال الحرارية عند الحرق.

الدولوميت (dolomite) الذي يتكون أساسا من ($CaCO_3$ + Mg CO_3) يتم حرقه جيدا أكسيد الكالسيوم، periclase (MgO). الدولوميت كما هو له ميل للتميؤ وهو غير مناسب كحراريات ولذا يتم عدم تنشيطه بتحويله إلى السيليكات أو إلى مركبات أخرى. استعداد الدولوميت للتميؤ المحروق يمكن إبعاده بتحويل الكالسيوم إلى داي كالسيوم سيليكيت أو تراي كالسيوم سيليكيت في وجود Fe_2O_3 وسوبر بنتين (super pentine)

بالتتالـــي. وجود Fe_2O_3 للتحـــول إلى الـــداي كالسيـــوم سيليكيت يمنع تكـــون مركب (Y. dicalcium silicate) والـــذي ينـــتج عنه انفجار بسبب الزيادة ١٠% في حجمه عند درجة حرارة التشغيل. التحميص (calcinations) لخليط من الدولوميت، surpentine عند ١٦٠٠ °م ينتج التراي كالسيوم سيليكيت و MgO والذي يكون مادة حرارية جيدة.

الخلط: (Mixing)

المادة الحرارية المطحونة يتم خلطها مع مادة ربط بالطريقة التي تمكن من التوزيع المتساوي للمادة البلاستيكية خلال المخلوط لتسهيل الصب والتشكيل.

عـــادة يـــتم الخلـــط فـــي خلاطة عجن الطفلة (pug mills) للتوزيع المتساوي للحبيـــبات الدقيقة والخشنة في كل الكتلة. تضاف كمية المياه السابق تقديرها، وكذلك الإضـــافات ومادة الربط والجروج (كسر المادة الحرارية)، ومواد التثبيت ويتم الخلط الجـــيد للكـــتلة لتأكيد الحصول على منتج مكوناته متجانسة وكذلك التوزيع المتجانس للحبيبات الدقيقة والخشنة والمادة البلاستيكية ومادة الربط....الخ. لسهولة التشكيل في القالـــب وتوفيـــر الخواص المفيدة في الطفل الحراري المحروق. لتأكيد زيادة اللدونة لسهولة التشكيل في القالب، فإن الخليط يظل كما هو لمدة يوم واحد أو أكثر.

الخلط يمكن أن يكون جافا، أو رطبا أو شبه لدن (Semi-plastic). يستخدم من ١٤ – ٢٠% مـــن المـــاء فـــي الخلـــط الرطب والذي يستخدم عادة في حالة التشكيل الـــيدوي. المخالـــيط شـــبه لدنة يكون به نسبة أقل من المياه للوصول على شبه حالة اللدونـــة، بينما الخليط الجاف يحتوي على خليط قاعدي وخليط طفلة محتويا على أقل مـــن ٥% ماء. نظرا لأن الخلط مع كمية المياه القليلة هذه يكون صعبا، فإنه يستخدم المـــاء فـــي شـــكل رشاشـــات صغيرة للحصول على الخلط الجيد. نظرا للحاجة إلى الـــضغوط العالـــية للتشكيل فإن المخاليط الشبه لدنة والجافة يتم ضغطها آليا. مخاليط الطفلـــة يتم الحصول عليها كذلك في شكل محاليل غروية (colloidal) مناسبة للتشكيل بالسبك المنزلق (slip casting).

التشكيل أو القولبة: (Moulding)

يتم التشكيل ميكانيكيا إما باستخدام الضغط العالي أو يدويا لزيادة الكثافة (بإزالة الهواء) وزيادة القوة لمادة الحراريات. التشكيل الذي يلي الخلط للمواد الحرارية يتم آليا أو يدويا بالضغط والبثق. التشكيل اليدوي (الناجح مع المخاليط الرطبة) يتم في صناديق خشبية وهو أقل تكلفة عن التشكيل الآلي في حالة التشكيل بالقطعة. ولكن التشكيل الآلي له استخدامات عملية أكثر وأقل في التكلفة في حالة إنتاج أشكال حرارية قياسية. الحرارية المشكلة آليا لها قوة أكبر وكثافة أعلى مقارنة بالتشكيل اليدوي. يمكن استخدام التشكيل الآلي للمخاليط شبه اللدنة باستخدام ضغوط التشكيل متوسطة. يستخدم البثق (extrusion) عادة للحصول على الأشكال الأولية ذات الأبعاد التقريبية والتي يتم بعد ذلك ضغطها إلى الأشكال الصحيحة. التشكيل الآلي للمخلوط الجاف يتطلب ضغط حوالي ١٠٠٠ كجرام/ سم^{٢} أو أكثر.

عند ضغوط التشكيل العالية فإن الهواء يحتجز في الحراريات وبسبب الرقائق (laminations). لذلك فإنه يتم إزالة الهواء من الحراريات بالطرق الآتية:

- ضغط المادة ثم السماح بالتشقق، أخيرا إعادة الضغط لقفل المسام.
- توفير حالة التفريغ في النظام خلال فتحات تنفيث في القالب.
- إمرار غاز (مثل غاز البيوتين) خلال القالب لاستبدال الهواء (الغاز يمتص بواسطة الطفلة عند الضغط).

تزداد قوة وكثافة الحراريات مع إزالة الهواء بسبب خفض الترقيق والتشقق. تزداد الكثافة تكون كذلك بسبب التخلص من الهواء ذو الكثافة القليلة عن المادة الحرارية و/ أو قفل المسام.

الطريقة المستخدمة في تشكيل الحراريات المفرغة أو ذات الأشكال الخاصة الأخرى هي الصب الزلق (slipcasting) حيث الردغة (colloidal suspension) يتم صبها في قوالب من الجبس التي تمتص الماء وتعمل على ترسيب طبقة طفلة متجانسة على

حوائط القالب. مع ترسيب السمك المطلوب من الطفلة (الذي يعتمد على الزمن الخاص بعملــية الترسيب)، فإن الخليط الزائد في الردغة يتم صبه خارج القالب بما ينتج عنه حراريات مفرغة ذات كنتورات غير منتظمة داخلية.

ضــغط المــسحوق يستخدم لتشكيل الحراريات للحصول على الدمج الجاف أو خليط المــسحوق الحراري المرطب قليلا في قوالب معدنية باستخدام الضغط العالي الكافي لإنــتاج أشــكال حرارية كثيفة وقوية. عمليات التشكيل الحديثة المستخدمة في بعض الحــراريات تشمل الضغط النشط على الساخن والضغط المتساوي من جميع الجهات (isostatic pressing).

التجفيف: (Drying)

يــتم التجفــيف بمعــدل بطــئ لتجنب الفراغات والانكماش العالي. تجفيف الحراريات التي تم تشكيلها يزيد قوتها الأولية بإزالة الرطوبة وبذا تكون آمنة لعمليات الــتداول. يــتم التجفــيف عادة في الظل وليس بالتعرض المباشر لأشعة الشمس على مساحة كبيرة من أرض التجفيف. تستخدم كذلك الأراضي التي يتم تسخينها بالمخلفات الحــرارية مــن الأفران عند وضع الحراريات في صفوف مفتوحة. يتم التجفيف في مجموعة ظروف سابق تحديدها (من الحرارة والرطوبة) مع معدل التجفيف عند أدناه لتجنب التشققات وتكون الشروخ.

للتجفيف السريع للحراريات ذات الشكل والحجم الثابت، تستخدم الأفران النفقية (tunnel kilns)، حيث الحراريات الخام يتم رصها في عربات نقل منخفضة (bogies) أو علــى الــسيور المتحركة خلال النفق في اتجاه معاكس لتدفق الهواء الساخن. في هذه الظــروف فــإن ظروف التجفيف لا يلزم تغييرها (حيث أن شكل وأحجام الحراريات ثابت) لتأكيد التجفيف بدون تلف الحرارية عند حدوث الانكماش العالي. تكون الشقوق الذي يحدث عند زيادة معدل التجفيف.

تــستخدم المجففــات ذات الرطوبة المحكمة لتجفيف الحراريات ذات الأشكال المعقــدة. معدل التجفيف للطوب الحراري يجب أن يكون منخفض جدا لتجنب حدوث

التشققات والتي يكون حدوث احتمالها أقصاه عند التجفيف.

الحرق (Burning)

يتم حرق الطوب في الفرن (فرن نفقي – tunnel kiln) أو (فرن السحب السفلي أو التـيار الهابط – downdraft) لإزالة ماء التميؤ، الترجيج (vitrification) والحصول علـى شـكل ثابـت. يـتم انكمـاش في الحجم أثناء الحرق يصل إلى ٣٠%. حرق الحـراريات الـذي يتبع تطوير تسهيلات تجفيفها للشكل المعدني الثابت وقوة الكسر العالية للمنتجات النهائية.

درجــة الحــرق لطوب السيليكا يوضح طبقا لوزنها النوعي. الوزن النوعي العالي ٢,٥ يوضح وجود كمية كبيرة من الكوارتز الذي لم يتحول حيث الوزن النوعي ٢,٣ إلــى ٢,١٧٧ يوضــح الحــرق الجـيد وتحـول الكوارتـز إلى الكريستوباليت (cristobalite) م/ أو ترادايميت (tridymie).

التـسخين السريع لحراريات السيليكا أعلى من درجة حرارة التحول يمكن أن ينتج عنه تقشرها وتشققها بسبب الإجهادات الداخلية بسبب التغير الكبير في الحجم في الحراريات. يمكن منعه باتباع التسخين الحذر للبرنامج حتى في حالة الاستخدام النهائي للحراريات المحروقة في الأفران حيث يحدث بعض التحولات ثانيا إلى الكوارتز عند تبــريدها. طوب السيليكا يتم وضعه في الفرن بفواصل صغيرة لمقابلة متطلبات تمدده أثـناء الحرق بينما الطوب من الطفل الحراري يمكن التصاقه جيدا (نظرا لأنه ينكمش من الحرق) للحصول على أقصى إنتاج.

حرق الطوب يتم إما في أفران التيار الساخن السفلى (down draught)، أو من الـنوع على دفعات (batch) أو الأفران النفقية. أفران من النوع على دفعات حيث يتم الحــرق هــي مستهلكة للوقت بسبب عمل ثلاث عمليات وهي تعبئة الطوب والحرق والتبريد. صعوبة الحصول على درجة حرارة متجانسة خلال فرق الدفعة الواحدة (كما في حالة التسخين بالفحم أو الكوك) ينتج عنه منتج محروق جيدا أو بالحرق الزائد عند

مـــنطقة القـــاع وطوب غير تام الحرق من المنطقة الأبرد. ولكن في الأفران الحديثة (التـــي تنقسم إلى مختلف الأجزاء)، يتم التسخين في غرفة واحدة وعند درجة حرارة واحـــدة وفقـــط بعـــد ذلك يتحرك اللهب إلى الغرفة التالية. كمية هواء الحرق السابق تحديدها يتم تسخينها مسبقا خلال بعض حجرات التبريد للفرن والتي تعجل كذلك معدل التبريد للحراريات المحروقة وبذا ينخفض وقت الإنتاج. وبالمثل، الغازات العادمة من غـــرف الحرق يتم تمريرها خلال غرف الفرن المعبأة جديدا بالطوب وذلك للتسخين المسبق الحراريات المجففة والذي يؤدي كذلك إلى المحافظة على طاقة الوقود.

ولكن للإنتاج الكمي للطوب الحراري فإن الأفران النفقية المستمرة هي الأكثر مناســـبة حـــيث الحراريات الجافة يتم تعبئتها عند أحد النهايات والمنتج المحروق يتم سحبه من النهاية الثانية عند درجة حرارة الغرفة تقريبا. يتم إكمال الحرق في المنطقة المتوســـطة للفرن الأكثر سخونة حيث الهواء الثانوي يدخل خلال نهاية السحب ويتم تسخينه المسبق حيث يعمل على تبريد الطوب المحروق في طريق خروجه من الفرن.

هواء الحرق السابق تسخينه يستخدم في حرق الوقود السائل (بعض الأفران ما زالـــت تـــستخدم الفحم/ الكوك كوقود) في المنطقة الوسطى الأكثر سخونة. التسخين المـــسبق للهواء، بالإضافة إلى زيادة درجة الحرارة في منطقة الحرق يقلل كذلك من اســـتهلاك الوقود. الغازات العادمة الساخنة عند تحركها في اتجاه نهاية التعبئة للفرن النفقي تفقد بعض حرارتها للحراريات الباردة وتسخينها مع تحرك هذه الحراريات في اتجاه منطقة الحرق والذي هي أسخن منطقة.

درجة حرارة الحرق لبعض أنواع الأفران كما في الجدول التالي:

جدول (٣/١) درجة حرارة الحرق التقليدية للحراريات

نوع الحراريات	درجة حرارة الحرق °م
الطوب الحراري	١٤٠٠ – ١٢٥٠
الطوب عالي الألومينا	١٥٥٠ – ١٤٥٠
طوب السيليكا	١٥١٠ – ١٤٥٠

نوع الحراريات	درجة حرارة الحرق °م
طوب الكروم	١٦٥٠ – ١٤٥٠
طوب الماجنيزيت	١٦٥٠ – ١٤٥٠
الطوب القاعدة بالربط المباشر (Direct Bonded Basic Bricks)	١٧٦٠ – ١٦٥٠
كربيد السيليكون (Sic)	١٥١٠ – ١٣٧٠

جدول (٣/٢) المكونات الرئيسية لأنواع الطوب الحراري

المكونات الرئيسية	الطوب الحراري	الطوب الحراري الألوميني	الطوب شبه السيليكا	طوب السيليمانيت	طوب الماجنيزيت	طوب الكروم
SiO_2	٧٠ – ٥٠	٥٥ – ٥٠	٩٥ – ٩٤	٣٥ – ٢٥	٥ – ١,٥	١٠ – ٣
Al_2O_3	٣٨ – ٢٥	٤٥ – ٣٨	٢ – ٠,٥	٦٥ – ٥٥	٤ – ١	٢٥ – ١٠
Fe_2O_3	٢ – ٥	٤ – ٢	١,٥ ٠,٥	١,٥ – ٠,٥	٨ – ٢	٢٥ – ١٢
Cr_2O_3	–	–	–	–	–	٤٥ – ٣٥
MgO	١ – ٠,٥	١ – ٠,٥	١ – ٠,٥	١ – ٠,٥	٩٢ – ٨٤	٣٥ – ١٢
CaO	١ – ٠,٥	١ – ٠,٥	٢,٢٥ – ٢	١ – ٠,٥	٥ – ٢	٢

نسبة TiO_2 والقلويات ($K_2O + Na_2O$) في الطوب الحراري السابق قد تتغير ما بين آثار قليلة إلى ٢%.

متطلبات الحراريات الجيدة لمهمة معينة:

- يجب أن تكون قادرة على تحمل درجات الحرارة المحتمل أن تتعرض لها.
- يجب ألا تتآكل بالخبث الناتج في الفرن والذي تتعرض له الحراريات.
- يجب أن تقاوم التقطيع بفعل الغازات العادمة واللهب.
- الانكماش والتمدد للحراريات يجب ألا يكون مفاجئا بل يجب أن يكون منتظما.
- يجب أن تقاوم الضغط الذي تتعرض له.
- يجب أن تكون قادرة على الاحتفاظ بالحرارة.
- يجب أن تكون قادرة على تحمل التغيرات المفاجئة في درجات الحرارة.

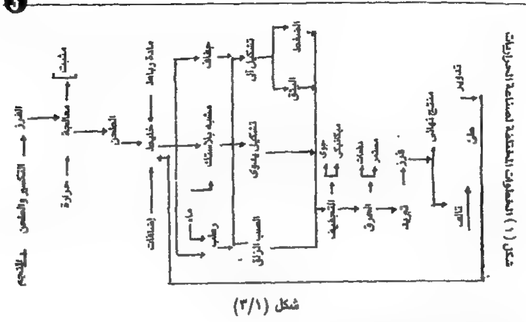
اختيار الحراريات:

اختـــيار الحـــراريات لأي استخدامات معينة يجب أن يراعى ا لحصول على أقـــصى كفاءة لمعدة الفرن أو الغلاية ويتوقف على خواص معينة للحراريات. وكذلك فـــإن اختـــيار مـــادة الحـــراريات لاستخدام معين يتحدد بنوع الفرن وحدود التسخين والظـــروف الـــسائدة....الـــخ، الجـــو الغـــازي، وجـــود الغـــازات ونوع العبوة من المعـــدن....الـــخ. لـــذلك فـــإن درجـــة الحرارة ليست هي المعيار الوحيد في اختيار الحراريات.

يجب أن يكون لدى مصمم أي فرن فكرة واضحة عن ظروف التشغيل التي يجب أن تـــواجها الحراريات. صناع الأفران والمستخدمين يجب أن يراعوا النقط الآتية قبل اختيار مادة الحراريات:

- المساحة المتاحة للاستخدام.
- درجات حرارة التشغيل.
- حدود البري والتصادم.
- الحمل الإنشائي للفرن.
- الإجهـــاد بسبب التدرج في درجات الحرارة في الفرن والتغيرات في درجات الحرارة.
- التوافق الكيماوي مع بيئة الفرن.
- الانتقال الحراري والحفاظ على الطاقة الحرارية.
- اعتبارات اقتصادية.

مـــن الضروري تقدير الظروف السابقة. تقييم الخواص المطلوبة يوفر الخطوط الإرشادية لاختيار مادة الحراريات المناسبة. صانع الفرن أو المستخدم يجب أن يراعي المحافظـــة على الطاقة. يمكن توفير الوقود إما بالعزل أو بسرعة العمل. وهذا يحقق تكاليف منخفضة للطاقة لكل طن من المنتج.



شكل (٣/١)

وصف أنواع الحراريات الهامة

١- الطفل الحراري (Fire Clay Refractory)

التصنيع:

الطفـل الحـراري هو سيليكات الألومنيوم المائية (Al_2O_3. $2SiO_2$. $2H_2O$). عند درجات الحرارة المرتفعة يتم التخلص من الماء. الطفل الحراري العادي يحتوي على ٢٥ – ٤٥% Al_2O_3 ، ٥٠ إلى ٨٠% SiO_2. الطفل بمحتوى عالي من Al_2O_3 يسمى عادة الحـراريات عالـية الألومـينا. ينقسم الطفل إلى عديد من الأنواع مثل الطفل الصلب (Flint)، الطفل اللدن (Plastic)، الكولين....الخ. كلمة الطوب الحراري تعني الطوب من الطفـل الحراري. طفلة الصلب والتي هي الصوان الحراري (Flint) هي طفلة شديدة الـصلابة وليست لدنة. يمكن زيادة لدونتها بإضافة طفلة للربط. الحراريات من الطفل اللـدن يمكن زيادة قدرتها الحراريات بإضافة طفلة له خاصية حرارية أكثر. الخواص المطلـوبة للطفـل الحـراري يتم الحصول عليها بخليط أنواع الطفلة المختلفة بنسب مقـبولة. درجة حرارة الانصهار للطفل الحراري (تختلف من ١٥٨٠ إلى ١٧٥٠ °م) وتنخفض بإضافة القلويات، الرمل، الزلط، سيليكات الكالسيوم، أكسيد الحديد، سيليكات

المغنسيوم، سيليكات الحديد...الخ. أكثر العناصر ضررا هي العناصر القلوية القاعدية التي تكون السيليكات المزدوجة ذات درجة حرارة إنصهار منخفضة.

مكونات ودرجة حرارة انصهار لبعض الطفل الحراري في الجدول الآتي

المكونات %	أنواع الطفل		
	لدن	شبه لدن	صلب – صوان
Al_2O_3	٣٨ – ٢٦	٢٨ – ١٧	٣٨ – ٢٩
SiO_2	٦١– ٤٨	٧٤– ٥٦	٧٥– ٤٨
Fe_2O_3	٢،٥ – ٠،٦	٢– ٠،٦	١،٦ – ٠،٦
TiO_2	صفر – ١،٨	١،٥ – ٠،٨	٢ – ٠،٥
CaO	صفر – ١،٣	صفر – ٢،٧٥	صفر – ٦٠،٠
قلويات	١٥ ،٠ – ٠،٩	---	أقل من ٠،٥
درجة حرارة الانصهار °م	١٧٢٥ – ١٦٠٠	١٧٠٠– ١٦٠٠	١٧٥٠ – ١٦٥٠

الطفلــة التــي يتم إنتاجها من المنجم يتم تركها في الهواء الطلق حيث يحدث تآكل للمادة العضوية الموجودة فيها بسبب الحرارة والبرودة والظروف المناخية. وهذا ينتج عنه زيادة في لدونتها بالإضافة إلى إنتاج بعض الأحماض العضوية. يتم التكسير والطحــن فــي كــسارات لفافة (gyratory crushers) ، وفي الرحى الحدية التي تدور حجارتها الأسطوانية على حدها في حوض دائري (edge runners).

الطفــل الحــراري يمكــن أن يعلق به الماء ميكانيكيا بالإضافة إلى الماء العالق كيماويا. أثناء الحرق، وبسبب التخلص من كل هذا الماء وتأثير انخفاض درجة حرارة الانــصهار لوجــود الملوثات، فإن المنتج ينكمش جدا ويصبح خارج الشكل والحجم. للتغلب على هذه الصعوبة، يتم خلط الطفل الحراري مع مواد مثل السيليكا التي تتمدد و/أو كمــية كبيــرة من المواد التي لا تنكمش. هذه المادة الأخيرة تسمى (grog) وهي

كسر الفخار. كسر الفخار (الجروج) هو طفل حراري سبق تسخينه إلى حوالي ١٣٠٠ °م بحيث لا يحدث أي انكماش آخر أو الغير مستخدم. تضاف كمية قليلة من الطفل اللدن لتسهيل التشكيل. يتم عمل الخليط بطحن الطفل الحراري الخام والجروج والطفل اللدن مع الماء. توجد طرق عديدة لإعطاء الشكل النهائي للمخلوط. في الجو البارد والأكثر رطوبة يتم التجفيف في مجففات. إضافة الجروج إلى الطفل الحراري كعنصر مضاد للانكماش في شكل حبيبات زاوية ذات أحجام مختلفة لتوفير أفضل تماسك للحبيبات. الميزة الرئيسية لإضافة الجروج للطفلة هي:

- خفض الانكماش مع التسخين.
- زيادة القوة للحراريات بعد الحرق.
- مقاومة عالية للتشقق.
- زيادة الوزن النوعي وانخفاض المسامية.
- زيادة معدل الإنتاج بسبب ضرورة انخفاض الماء المضاف للحصول على لدونة قابلة للتشكيل وزمن أقل لتجفيف الحراريات الخام. تتراوح نسبة إضافة الجروج ما بين ٢٠ إلى ٩٠% في خليط الطفلة طبقا لخواص الطفل الخام والخواص المطلوبة للمنتجات النهائية.

زيادة نسبة الجروج تحتم استخدام طفلة عالية اللدونة لتوفير الربط المناسب. الحراريات العادية من الطفل الحراري تحتوي على الجروج بنسبة ٢٠ – ٤٠%. استخدام نسبة أعلى من الجروج ينتج عنه استخدام في درجة حرارة أعلى وتحسين نوعية المنتج النهائي. الطفل الحراري بنسبة عالية من الجروج قد يحتوي على الجروج حتى نسبة ٩٠%. اختلاف حجم المنتج النهائي يكون بسبب الانكماش العالي الذي يحدث مع التسخين أثناء التجفيف والحرق.

يمكن تحسين نوعية الجروج باستخدام:

- الانتشار الدقيق والتطبيع المتقن لرباط الطفل عالي اللدونة لتأكيد التوزيع الجيد والربط الجيد بطبقة رقيقة من الطفل ما أمكن.

- الكثافة العالية لحبيبات المادة المحمصة لتحسين قوة وكفاءة المنتج.
- التدرج المناسب للمواد الخام في المخلوط لتأكيد أعلى كثافة دمج ويقلل استخدام الطفل اللدن للربط.
- تأكيد الخلط الجيد وتجانس الخواص في المنتج النهائي بالتغذية المناسبة لمختلف الخامات في المخلوط.

يتم خلط الطفل الحراري الذي تم طحنه إلى قطع صغيرة مع الجروج الذي يتم إعداده مع الرابط من الطفل أو البواركس المحمص، في حالة الضروري في للشكل الجاف أو الرطب. في الخلط الرطب، يتم خلط المواد بالماء في مطحنة الطفلة أو العمومية (Pug Millor Pan Mill). يتم سقي خليط المواد في الماء لمدة ٣٠ – ٦٠ ساعة أو أكثر قبل نقلها على المطحنة ليمكن أن تمتص الطفلة الماء والتوزيع المتجانس للكتلة. الخليط بعد الخلط يمكن أن يترك لينضج لعدة أيام في سرداب وقبو أو مطمورة باردة وذلك قبل التشكيل لزيادة اللدونة. تشكيل الطوب يتم إما بالتشكيل اليدوي، الضغط الهوائي، الضغط الميكانيكي. المحتوى من الماء في التشكيل اليدوي والتشكيل الميكانيكي للمخلوط هو من ٧ إلى ٩% ، ٤ – ٧% على التوالي. يلزم زيادة ضغط التشكيل للمخاليط ذات المحتوى المنخفض من الرطوبة بينما زيادة المحتوى من الرطوبة تزيد من احتمال الانهيار للمنتج عند خروج المنتج من القالب. الطوب الحراري بالتشكيل اليدوي يكون أقل كثافة مقارنة بالتشكيل الميكانيكي كما أنه لا يكون بالأبعاد المناسبة. التشكيل بالماكينة يزيد من معدل الإنتاج. معدات الضغط الميكانيكي يمكن أن تكون المنضدة الدوارة (rotating table) لولب الاحتكاك (friction screw)، الرجرجة والهز الآلي، الهيدروليكي، أو النوع المفصلي (toggle). طرق التشكيل الأخرى هي البثق، القطع بالسلك وإعادة الضغط. أشكال خاصة مثل الإطارات والأغلفة...الخ يتم عملها بالبثق ثم إعادة الضغط. الخليط الحراري المشكل بالبثق يحتاج إلى ١٥ – ٢٠% رطوبة في الخليط، لذلك فإن الأشكال التي يتم بثقها تتطلب عناية خاصة أثناء التجفيف لتجنب حدوث تشققات وعيوب أخرى. الضغط اللازم

لحلــزون الاحتكاك، والضغط المفصلي وكذلك الهيدروليكي لإنتاج أشكال معقدة (لها حجم متجانس، بناء متجانس وتحسن في قوة الانضغاط) باستخدام خليط يحتوي على ٥ – ٧% رطوبة هو من ٣٠٠ – ٨٠٠ كجرام/ سم^{٢}.

زيادة كمية المواد الدقيقة والرطوبة تقلل من تأثير عملية التخلص من الهواء. عملــية الــضغط للطوب ينتج عنها مسامية عالية وانخفاض قوة الطوب بينما الضغط الزائد قد يسبب تكون شقوق في الطوب. القوالب والفرم المستخدمة في تشكيل الطوب الحــراري هــي أكبر حجما قليلا عن الشكل النهائي للحراريات حيث أنها تنكمش مع التسخين والحرق.

الطوب بعد التشكيل يتم تجفيفه في الظل أو في حجرات جيدة التهوية. تستخدم الأرضــية التي يتم تسخينها بالبخار للتجفيف النهائي للطوب الذي يتم تشكيله يدويا أو بالبــثق بعد ١ – ٤ يوم من التجفيف الطبيعي. يتم التجفيف كذلك في المجففات النفقية المــستمرة حيث العربات المحملة بالطوب الذي تم تشكيله تدفع بمعدل ثابت، والهواء الــساخن عند ١٥٠ – ٢٥٠ °م يدفع من نهاية السحب للمنتج الذي يترك المجفف عند ٦٠ – ٨٠ °م عن طرف النهاية للسحب. الرطوبة المفقودة من الطوب تلتصق بالهواء الخارجــي حــيث تزداد الرطوبة عند طرف السحب للمجفف ويحدث تحكم في معدل الجفاف من المراحل الأولية.

المجففات ذات التحكم في الرطوبة التي يتم تسخينها بالغازات العادمة الساخنة تــستخدم فـــي التجفــيف. طبقا للمكونات، وطريقة التشكيل ونوع وحجم الطوب، فإن إجمالــي زمن التجفيف يتراوح من ٢٤ إلى ٢٠٠ ساعة. معدل التجفيف البطئ يؤكد تجــانس التجفــيف لكل من داخل وخارج الطوب المدمج بينما معدل التبريد السريع يجعــل احــتمال التــشقق للطوب بسبب عدم تساوي وتجانس التجفيف وكذلك لوجود إجهادات شد في الأشكال الحرارية.

يمكــن عــندئذ حرق الطوب في الفرن. عند درجة الحرارة المنخفضة يمكن الــتخلص مــن المــاء. عند ٩٨٠ °م يحدث تفاعل منتج للحرارة بسبب تكون مركب

المولليت ($3Al_2O_3.\ 2SiO_2$) والسيليكا الزائدة يحدث لها تبلر في شكل (cristoballite). عادة يتم رفع درجة الحرارة إلى ١٤٠٠ °م واستمرارها لعدة ساعات قليلة للحصول على خواص متجانسة. عند استخدام درجات حرارة أعلى، فإن درجة حرارة الحرق يمكن أن تكون ١٥٠٠ °م. يتم عندئذ إيقاف لهب الفرن والسماح بالتبريد البطئ مع القفل. إجمالي الوقت اللازم هو حوالي أسبوع.

الطوب الحراري الذي تم تجفيفه يتم حرقه في أفران مستمرة أو الأفران التي تعمل على دفعات والتي يمكن أن تكون ذات تيار التسخين العلوي أو تيار التسخين السفلي أو تيار التسخين الأفقي. طبقا لدرجة حرارة الفرن والتغيرات التي تحدث في الحراريات التي جفت، فإن حرق الطوب الحراري ينقسم إلى المراحل الخمس التالية:

- التبخير أو الترطيب.
- تحلل الطفل.
- الأكسدة أو مرحلة الحرق الكلي.
- الصهر الأولي.
- التلدين والتبريد.

في المرحلة الأولى للحرق وهي التبخير، فإن الرطوبة المتبقية في الطوب الجاف يتم طردها عند ١٢٠ °م والتي تستمر مع ارتفاع درجة حرارة الفرن. هذه المرحلة للتبخير تستمر لمدة حوالي ٢٠ ساعة.

أثناء المرحلة الثانية والتي تستمر كذلك لمدة ٢٠ ساعة (والتي تبدأ عند ٣٥٠ °م وتمتد حتى ٩٠٠ °م) يحدث تحلل للطفل مع طرد المواد المتطايرة القابلة للاحتراق وأي ماء جزئي متبقي.

في مرحلة الأكسدة أو الحرق الكلي (والتي تستمر من ١٢ إلى ٣٦ ساعة وترتفع درجة الحرارة حتى ١٣٥٠ °م) حيث انتقال لمختلف المواد المعدنية. عند ٩٥٠ °م يحدث تكون منتج للحرارة للموليت ($3\ Al_2O_3.\ 2SiO_2$) عندما تبدأ الألومنيا في الاتحاد مع السيليكا. ما بين ١٣٥٠ – ١٣٨٠ °م يتم إتمام التبلر للموليت. الطفل

ينكمش وتزداد صلابته لهذا لا يحدث انكماش للحراريات مع أي التسخين تالي أو عند الاستخدام . مرحلة الحرق الرابعة (والتي تصل إلى ١٥٠٠ °م) يصاحبها الصهر الأولى للملوثات حيث تمتلي الفواصل بين الحبيبات الصلبة بنواتج الصهر. بسبب ملء المسام بواسطة الكتلة الزجاجية، فإن مسامية الحراريات منخفض، ويحدث ربط الحبيبات الطفلة والجروج بما ينتج عنه منتج مدمج وصلب. درجة حرارة الصهر تكون أعلى من تلك المفترض أن يستخدم فيها الطوب. يتم سقي الطوب عند درجات حرارة أعلى للحصول على تجانس الخواص.

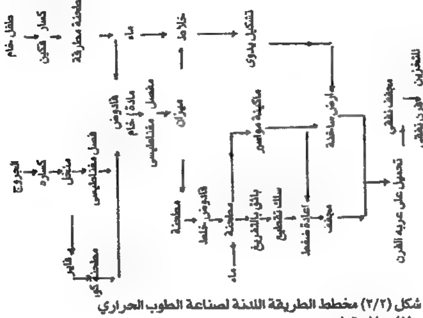
تشمل المرحلة الأخيرة للتلدين والتبريد التبريد البطئ جدا للطوب المحروق في الأفران نفسها. في الأفران ذات الدفعات، يتم إطفاء اللهب، وقفل الخانق ومعظم الحرارة تفقد بالإشعاع. هذا التبريد يستغرق نفس الوقت مثل التسخين للطوب إلى درجة حرارة النضج.

تستخدم معدلات الحرق العالية للحراريات ذات المحتوى العالي من الجروج والذي له انكماش منخفض. الحراريات ذات المحتوى العالي من الألومنيا تتطلب درجة حرارة حرق مرتفعة (١٥٠٠ – ١٦٨٠ °م) طبقا لنسبة الألومينا. يمكن خفض درجة حرارة الحراريات وهذه تعمل على تماسك حبيبات الحراريات. ولكن مثل هذه الحراريات تنخفض قدرتها الحرارية عند قيم التحميل.

بعد الحرق يتم تشوين الحراريات. يتم التخلص من الطوب الذي تم حرقه أكثر من اللازم والطوب الغير تام الحرق يتم إعادة حرقه.

مخطط لصنع الطوب الحراري بالطرق الرطبة اللدنة وبالطرق الجافة موضح في الأشكال (٣/٢) ، (٣/٣).

في الواقع فإن درجة حرارة الحرق للطوب الحراري تتوقف على مكوناتها وهي تزداد بزيادة المحتوى من الألومينا، وأقصى درجة حرارة للحرق هي ٦٠٠ – ١٦٥٠ °م لطوب الألومينا ٨٠ – ٩٥%. جداول الحرق التقليدية في الأفران النفقية منخفضة درجة الحرارة وعالية درجة الحرارة موضحة في الأشكال (٣/٤)، (٣/٥) بالتتالي.





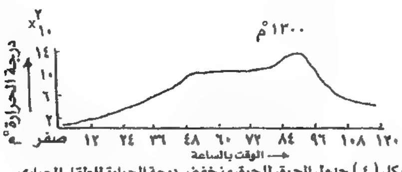
شكل (٢/٢) مخطط الطريقة اللدنة لصناعة الطوب الحراري

طفل بلاستيك
كساره اسطوانية
مطحنة مطرقة
فرز هوائي
قادوسي

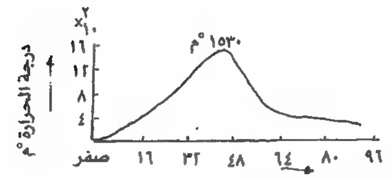
مادة خام محمصة
كساره فكيه
مطحنه كور
فصل مغناطيسي
كساره
القاير
غربال
قادوسي

ماكينات ميزان
ماء
خلط
قادس للخلط
ضغط هيدروليكي
تحميل على عربات الفرن
مجفف نفقي
فرن نفقي
التخزين

شكل (٣) مخطط الطوب الحراري بالطريقة الجافة



شكل (٤) جدول الحرق للحرق منخفض درجة الحرارة للطفل الحراري في الفرن النفقي



شكل (٥) جدول الحرق للحرق عالي درجة الحرارة للطفل الحراري في الفرن النفقي

خواص الطوب الحراري من الطفلة الحرارية:

خواص الطوب الحراري من الطفلة الحرارية تتوقف على نسب ونوع الطفلة وكمية الألومنيوم، الجروج، المكونات الأخرى الموجودة. وجود مواد غير مرغوب فيها في الطوب الطفل الحراري (حتى ١٥%) مثل السيليكا الحرة والألومينا من عوامل التفكك والتحلل الجوية، الكربونات، أكسيد الحديد، أملاح التيتانيت والسلفيد، أملاح الكبريتات والقلويات، القلويات الأرضية، المواد الكربونية، هذه المواد تقلل من المقاومة الحرارية للطفلة. تتأثر خواص الطوب الطفلي الحراري بالمحتوى من الرطوبة للطوب المشكل، درجة التجفيف، ومدة ودرجة حرارة الحرق وعملية التصنيع. لذلك فإن ضبط المكونات وعملية التصنيع يتم لإنتاج طوب حراري مناسب لاستخدام محدد.

اللون:

عمــوما بنــي فــاتح أو لامع فاتح. يتوقف لون الطوب الطفلي الحراري على محــتوى المــادة الخام من الحديد. الطوب بالمحتوى العالي من الحديد له لون غامق. تتوقف الصلاحية وتختلف طبقا لدرجة حرارة الحرق. الطوب الحراري الصلب الذي أجرى له الحرق الصحيح يكون بصلابة مثل صلابة الصلب.

المسامية:

تتــراوح المــسامية مــا بين ٨ إلى ٢٤% طبقا لدرجة الحرارة التي تم عندها الحرق. كلما زادت المسامية كلما قلت المقاومة لعوامل التآكل لمحتوى الفرن وعوامل المساعدة في الصهر (Fluxes)..الخ، وكذلك انخفاض تأثير التغيرات المفاجئة في درجة الحرارة. كمية ونعومة الجروج المستخدم تؤثر كذلك على المسامية لهذه الحراريات.

الخواص الكيماوية:

عــند درجات الحرارة المرتفعة الطفلة الحرارية تتحد مع القلويات مثل الصودا والــبوتاس...الــخ، قلويات أخرى مثل الجير المطفي المجنزيا وأكسيد الحديد، نواتج الحريق....الخ، أو مع الأملاح مثل الكلوريدات، الكبريتات والكربونات من الألومينات المنصهرة، السيليكات والوميتات السيليكات (alumino silicates).

مقاومة الخبث: (Resitance to Slag)

مقاومة الخبث والمود العدوانية الأخرى لا يعود إلى مكونات الطفلة ولكن يرجع إلـــى تماسك وتناسب الشكل العام للسطح. لذلك فإن الحراريات المحروقة عند درجات حرارة مرتفعة جدا لها مقاومة جيدة لعدوانية الخبث. الخبث المحتوى على كربونات أو نترات الصوديوم أو البوتاسيوم تكون عدوانية تحديدا.

كلمـــا قلـــت دقـــة شـــكل حبيبات الحراريات كلما زادت مقاومتها للمجالات العدوانية المختلفة.

في حالة وجود أول أكسيد الكربون في الغازات العادمة، فإنه يتحلل بفعل الطفلة الحرارية عند درجات الحرارة العالية مع ترسيب الكربون عند ٤٠٠ – ٩٠٠ °م.

القوة ومقاومة السحق والتفتت strength, resistance to crushing

تتغير قوة مقاومة السحق للطوب الحراري طبقا لدرجة الحرارة. الطوب الطفل الحراري العادي والذي له إجهاد سحق (crushing strength) مثل ٩٥٠ كيلوجرام/ سم^{2} عند البرودة، يكون قوة السحق المختلفة الآتية عند مختلف درجات الحرارة.

درجة الحرارة	حمل الكسر كج/ سم^{2}
٢٠ °م	٩٥٠
٨٠٠ °م	٥٥٥
١٠٠٠ °م	٤٧٥
١٣٠٠ °م	٣٦٠
١٥٠٠ °م	٦٥

يوجد خفض كبير في قوة السحق أو الكسر عند حوالي ٨٠٠ °م والذي له أهمية كبيرة في تكنولوجيا الأفران.

السحق البارد للحراريات التي تم حرقها جيدا يكون أعلى عن ذلك للحراريات اللينة (soft) المحروقة. طبيعي، قوة الكسر على البارد للطوب الطفلي الحراري يختلف ما بين ٢٠٠ إلى ٤٠٠ كجم/ سم^{2} طبقا للمكونات، الشكل، ودرجة حرارة الحرق.

المقاومة الحرارية (Refractoriness)

المقاومة الحرارية هي مقاومة الانصهار للحراريات عند الارتفاع المنتظم في درجات الحرارة وفي عدم وجود ظروف اضطراب. الطفل الحراري يختلف كثيرا في المقاومة الحرارية طبقا للطفل الحراري المستخدم في صناعته. توجد ثلاث درجات من الطفل الحراري:

الدرجة الأولى لها درجة حرارة لليونة ما بين ١٧٧٠ – ١٧٩٠ °م

الدرجة الأولى لها درجة حرارة لليونة ما بين ١٦٧٠ – ١٧٧٠ °م

الدرجة الثانية لها درجة حرارة لليونة ما بين ١٥٨٠ – ١٦٧٠ °م

الدرجة الثالثة لها درجة حرارة لليونة ما بين ١٥٨٠ – ١٦٧٠ °م

لذلك فإن القوة الحرارية لطوب الطفل الحراري تقابل نقطة الليونة للطفل الحراري المستخدم.

اخــتلافات كثيرة في المقاومة الحرارية لطوب الطفل الحراري تختلف ما بين مكافئ القمـــع الحراري (pyrometric cone equivalent) في القيم لـــ ٣١ أكترون إلى ٣٤ طبقا لنوع الطفل المستخدم، محتواها من الألومينا ونوع الجروج المستخدم.

أقــصى درجة حرارة استخدام آمنة لطوب الطفل الحراري والحراريات الأخرى هي ١٥٤٥ °م.

المقاومة الحرارية تحت الأحمال (Refracloriness Under Load)

كــل الطفــل الحراري مع قليل من الاستثناءات له نقطة ليونة عند ١٣٥٠ °م تحت حمل ٣,٥ كجرام/ سم^2.

طوب الطفل الحراري عادة لا يسقط عند درجة حرارة أقل من ١٣٥٠ °م تحت حمل يــساوي ٢ كجــرام/ ســم^2. المقاومة الحرارية تحت الأحمال تتوقف على المكونات الكيماوية والبناء الكيماوي للمادة. الملوثات مثل الحديد، القلوي....الخ لها تأثير ضار وملاحظة على المقاومة الحرارية تحت الأحمال.

تأثير الحرارة (Effect of Heat)

عند تسخين الطفل الحراري تحدث أربع تغيرات واضحة:

١. الشوي أو التكليس (Baking)

الخبيز هو التسخين حتى تتحلل الطفلة ولايوجد فقد إضافي في الماء ويصبح الطفل مسامي. يحدث الخبيز ما بين ٥٠٠ – ٦٥٠ °م.

٢. التزجيج (Vifrifying)

التزجيج هو التسخين لحين انصهار المكونات وتبدأ الكتلة في فقد شكلها. التزجيج يحدث ما بين ١٥٥٠ – ١٧٧٠ °م.

٣. التليــين هو التسخين حتى بداية الانصهار للمكونات وبداية فقد الكتلة لشكلها ويحدث هذا ما بين ١٥٥٠ – ١٧٥٠ °م.

٤. الصهر (Fusion)

الصهر هي المرحلة التي عندها يحدث تغير للمادة من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة. تحدث هذه المرحلة عند درجة حرارة أعلى من ١٧٧٠ °م. أثناء الصهر يتحلل الموللـيت ($3Al_2O_3.2SiO_2$) ليكون خليط من الكورندم (corundum) (Al_2O_3) والموللّيت.

المرحلتين الأوليتين هي عموما تامة عند حرق الحراريات (مثل الطوب الحراري أو الكتل) بعد تصنيعها. بهدف إكمال هذه المراحل، فإن حرق الحراريات أثناء تصنيعها يجب أن يكون عاليا ما أمكن بحيث أن التغيرات في الحجم، التي تصاحب هذه المراحل، تكون تامة. المراحل الثالثة والرابعة للتسخين قد تحدث عند الاستخدام الحقيقي للحراريات في الفرن.

التشقق والتقشف أو حساسية التغير المفاجئ في الحرارة:

Spalling or Susceptibility to Sudden Changes in Temp

تفتت الحراريات عند التبريد السريع يسمى (spalling). كثيرا من طوب الطفل الحراري يتفتت عند التبريد السريع جدا. طوب الطفل الحراري الكثيف تفتت بسرعة أكبر عند التبريد المفاجئ. لذلك لزيادة المسامية لذلك يضاف الجروج أو نشارة الخبث للطفل الحراري، ولكن مع زيادة المسامية فإن مقاومة الحراريات للضغط، الاحتكاك والتآكل تقل. لذلك فإنه يتم ضبط مكونات الحراريات لعدم حدوث زيادة في المسامية الغير ملائمة.د

الأسباب الرئيسية للتشقق أو التفتت للطفل الحراري هي:

- انخفاض نسبة مادة الربط.
- الخلط الغير كافي.
- استخدام الضغط الغير منتظم أو الغير كافي أثناء التشكيل.
- عدم انتظام التسخين والتبريد للفرن عند حرق الحراريات.

يمكن زيادة مقاومة التشقق باستخدام الجروج الخشن، زيادة المسامية وخفض معامل التمدد.

طوب الطفل الحراري هو من الحراريات المستخدمة عادة نظرا لانخفاض سعره. استخدامه في الظروف القلوية يجب تجنبه نظرا لأنه له طبيعة حامضية إلى حد ما. نظرا لمقاومتة الممتازة للإجهاد الحراري، فإن طوب الطفل الحراري يستخدم في أفران الاسترجاع (regenerative furnace) (حيث تحمي غازاته الداخلة بالغازات المنطلقة)، والمسترجعات (التي تعيد بعض الحرارة المنطلقة إلى الغاز أو الماء). يستخدم هذا الطوب للعوادم في تبطين المداخن، سباكة الصلب، الأسمنت، الخزفيات، وفي صناعة البتروكيماويات وصناعة الصلب. كذلك يستخدم الطوب الحراري في الأفران اللافحة (blast furnace)، مواقد اللفح الساخن، التلبيد، التحميص، أفران صهر الزجاج وإعادة التسخين.

الحرارة النوعية (Specific Heat)

الحرارة النوعية لطوب الطفل الحراري منخفضة لتكون ٠,٠٢٥ وهي ترتفع سريعاً مع ارتفاع درجة الحرارة لتكون ٠,٢٦٤ عند ١٣٠٠ °م.

التوصيل الحراري (Thermal Conductivity)

يختلف التوصيل الحراري للطفل الحراري من ٠,٨ إلى ٠,٩ عند درجة حرارة من ٣٠٠ ° إلى ١١٠٠ °م. الطفل الحراري رغم أنه موصل ردئ للحرارة إلا أنه له قوة إشعاع عالية. لذلك فالمواد الموضوعة في غرف الحرق المصنوعة من الطوب الحراري يمكن تسخينها إلى درجة حرارة عالية رغم أن التوصيل الحراري للطفل الحراري منخفض.

المقاومة الكهربية:

تختلف المقاومة الكهربية لطوب الطفل الحراري من ١,٣٤ × ١٠ ^٨^ إلى ٨,٩ × ١٠ ^٢^ ما بين ٨٠٠ ، ١٥٠٠ °م.

قوة التحمل للطفل الحراري:

الطفــل الحــراري الأكثر تحملا والأفضل يجب أن تكون له كثافة واضحة، ومقاومة عالية للخبث، وقوة كسر عالية ولا يحدث له تغير في الحجم عند التسخين.

الخواص:

خواص طوب الطفل الحراري موضحة في الجدول التالي:

استخدام الطفل الحراري:

يــستخدم الطفــل الحراري أساسا في مختلف أنواع الافران الحرارية، وإعادة الاستخدام للغازات العادمة، الغلايات وكثيرا من الإنشاءات المشابهة التي يتم فيها توليد الحرارة أو التي خلالها تمر الغازات الساخنة (مثل أفران اللفح). بسبب معامل التمدد الحراري فإن طوب الطفل الحراري تكون مقاومة لإجهاد التشقق. الحراريات المحتوية على نسبة عالية من الجروج لها مقاومة عالية للتشقق عن تلك المحتوية على حبيبات دقيقة وخلطات منخفضة من الجروج.

جدول لخواص طوب الطفل الحراري

نوع طوب الطفل الحراري	نسبة Al_2O_3	نسبة Fe_2O_3	المقاومة الحرارية °م	المسامية %	الكثافة جم/ سم³	اجهاد الكسر كج/ سم²	مقاومة الصدمة الحرارية	التغير الطولي الثابت %	درجة الحرارة °م	الوقت
متوسط المقاومة الحرارية	٣٢-٣٠	٢,٥-٢	١٦٥٥	٢٥-٢٢	٢-١,٩٥	٢٥٠/٢٠٠	جيد	٠,٥ ±	١٣٥٠	٢ساعة
عالي المقاومة الحرارية	٤٠-٣٨	٢,٥-٢	١٦٩٩-١٧١٧	٢٦-٢٣	٢,١-٢	٢٣٠/١٧٠	جيد	٠,٥-	١٤٠٠	٢ساعة
فائق المقاومة الحرارية	٤٤-٤٢	١,٥-١	١٧٤٣-١٧٦٣	١٦-١٥	٢,٢-٢,١	٦٠٠/٤٠٠	جيد	٠,٥-	١٤٥٠	٢ساعة
	٤٤-٤٢	١,٥-١	١٧٤٣-١٧٦٣	٢٠-١٨	٢,٢-٢,١	٣٠٠/٢٥٠	ممتاز	٠,٥-	١٤٥٠	٢ساعة

السيليكا الحرارية (Silica Refratories)

المواد الخام للسيليكا الحرارية هي الأشكال المختلفة للرواسب الطبيعية لـ SiO_2 مثل الكوارتز، الكواريتزيت، الجانستر، الرمل، الحجر الرملي.....الخ. وجود زيادة من الأكاسيد القلوية يكون غير مطلوب نظرا لأنها تقلل من درجة حرارة الانصهار. أحد المصاعب الكبيرة بالنسبة للسيليكا الحرارية هي أن السيليكا توجد في عدة أشكال متأصلة (allotropic forms) والتي تكون ثابتة عند درجات الحرارة المختلفة ولها أوزان نوعية مختلفة. لذلك يتم اختيار المادة الخام التي يمكن تحويلها بسهولة إلى الشكل الأكثر ثباتا. لهذا السبب فإن الرمل العادي والكواتيزيت النقي ليس كافيا. المادة الخام يجب أن يكون لها بعض مادة البناء والمفضل أن تكون حبيبات السيليكا الدقيقة نفسها.

في الواقع، فإن الكوارتز هو الشكل الأكثر ثباتا عند درجة حرارة العادية والكوارتيزيت هو الأكثر استخداما لأنها الشكل الطبيعي للكورتز المتاح لعمل طوب السيليكا. ولكن الكوارتيزيت الذي يحتوي على ٩٦ – ٩٧% SiO_2 مع أقل من ٣% قلويات يكون مقبولا لصناعة طوب السيليكا، ولكن بالنسبة لطوب السيليكا الفائق TiO_2 + Al_2O_3 +محتوى من القلويات لا يزيد عن ٠,٥% ، مع مراعاة أن زيادة نسبة الملوثات تقلل من قدرة المقاومة الحرارية كثيرا.

الربط بين حبيبات السيليكا يتم بواسطة لبن الجير ($Ca(OH)_2$) والذي يعمل على أن يعجل من تكون كلا من الترايديميت والكريزتوباليت (tridymite, cristobalite). مواد معدنية أخرى (مثل FeO، Borax، Mg، Ba والكربونات والفلوريدات وفوسفات الليثيوم والصوديوم والبوتاسيوم....الخ) يتم إضافتها إلى المواد الخام لصناعة طوب السيليكا الحراري بأقل كمية مطلوبة نظرا لأنها تقلل من المقاومة الحرارية لطوب السيليكا. يستخدم كذلك خليط من الطفل والجير (lime) للربط، ولكن النسبة العالية من هذا الجير الحي تقلل لمقاومة الاحتكاك وقوة طوب السيليكا الحرارية. ولإنتاج طوب ذو طبقة سطحية صلبة (hardened case) وتحسن في القوة الميكانيكية يستخدم الغسول القلوي لسلفيت السيليلوز (cellulose sulphitelye) كمادة ربط. عند استخدام القار، الصمغ،

المــولاس....الخ كمادة ربط فإن ذلك يزيد من قوة الطوب قبل الحرق. تزداد مقاومة طــوب الـسيليكا ضد عدوانية الخبث بإضافة الزركون (zircon)، ولكن إجهاد الضغط للحراريات من الزركون والكوارتز أقل من تلك كمادة للكوارتيزيت أو الزركون. وعند الــرغبة فــي إنــتاج طوب السيليكا له كثافة عالية وخواص جيدة، يتم خلط حبيبات الكوايتزيت الخام الخشن (١ – ٣ مليمتر)، المتوســط (٠,٢ – ١ مليمــتر) والدقيــق (٢٠,٢ مليمتر) بعد غسيلها (للتخلص من الأتربة والملوثات) ثم التكسير والطحن (في كــسارة فكية ومطحنة الكور)، على أن يتم الخلط بنسب ٣٥ – ٤٠%، ١٠ – ١٥%، ٤٥ – ٥٠% بالتتالي.

التصنيع (Manifacture)

لصناعة طوب السيليكا فإن المواد المدرجة (مثل الكوارتيزيت) يتم خلطها مع الكمية المطلوبة من مادة الربط (مثل الجير المطفي) والماء في المطحنة العامة (pan mill) أو في خلاط ذو القاع الدوار في عكس اتجاه التدفق (in a pan mill or revolving bottom counter flow mixer) للحصول على عجينة لدنة. عند ارتفاع درجات الحرارة فــإن أكــسيد الكالسيوم (lime) يكون سيليكات الكالسيوم القابلة للانصهار والتي تعمل كمادة ربط. يتم عندئذ تشكيل الخليط يدويا في شكل كتل أو بالضغط بالماكنية للتشكيل.

المحتوى من الرطوبة في الخليط الشبه جاف (الذي يسمى الكتلة اللدنة tempered mass) يتوقف على نوع التشغيل ويتراوح ما بين ٤ – ٥% للضغط الهيدروليكي، ٧ – ٩% للتــشكيل الــيدوي. بينما المحتوى المنخفض من الرطوبة يتطلب ضغط أعلى للتــشكيل، إلا أن زيادة المحتوى من الرطوبة تزيد الفرصة لتشقق الطوب المضغوط عند التحرر من القوالب. بسبب عدم تجانس الضغط، فإن منتجات التشكيل اليدوي من الطــوب تكون ذات صلابة أو كثافة غير متساوية بينما التشكيل بالماكينة ينتج الطوب بصلابة عالية وكثافة متجانسة. ضغط التشكيل العالي ينتج طوب له مقاومة منخفضة لمقاومـــة الصدمات الحرارية وذلك لأن الكتلة المدمجة جيدا مع التسخين فإنها تتشقق بــسبب عدم وجود فاصل كافي بين حبيبات السيليكا التي تتمدد. الضغط الهيدروليكي

ينـتج طـوب لـه كثافة عالية ومسامية منخفضة، وقوة كسر عالية على البارد بينما القطاعـات الثقـيلة يتم تشكيلها يدويا. لإنتاج الأشكال القياسية فإنه يستخدم الضاغط بالاحـتكاك (friction pressing) أو ضاغط المنضدة الدوارة (rotating table) وذلك في حالـة الإنتاج الكمي. معدل التشكيل يتوقف على شكل وحجم الطوب وقد يتراوح ما بـين ١ إلى ٣٦ طوبة في الدقيقة القوالب والفرم لطوب السيليكا تكون أقل من الحجم (underside) لحـدود التجاوز المسموح به في التمدد ذلك لأن حجم السيليكا يزداد مع التسخين. يتم تجفيف الطوب في حجرات يتم تسخينها.

التجفيف العادي لطوب السيليكا قد يستغرق من ٤٨ إلى ٩٦ ساعة بينما التجفيف في الغرف الساخنة يحتاج إلى ١٢ ساعة أو أقل. الطوب المجفف يحتوي على أقل من ٠,٢% رطـوبة. تجفيف الطوب يجب أن يكون متجانسا خلال داخل وخارج الطوب لتجـنب تكوين التشققات. تستخدم كذلك المجففات النفقية باستخدام بخار الماء أو الغاز الـساخن العادم والناتج من لهب الفرن وذلك لتجانس جفاف الطوب. عند التجفيف في الغرف/ الأرضيات الساخنة فإن الطوب يحتاج إلى التقليب من آن إلى آخر للمحافظة على معدل تجفيف ثابت.

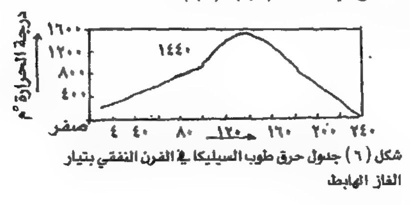
الطـوب الذي يتم تجفيفه في الغرف الساخنة، عندئذ فإن الطوب الجاف يلزم تداوله بحرص لتجنب انهياره. يلي ذلك النقل للأفران التي يتم تسخينها بحرق الغاز أو الفحم. في صناعة الطوب الحراري فإن الماء العالق كيماويا وميكانيكيا يتم إزالته أولا. مع استمرار التسخين فإنه يحدث تغيرات معدنية وتغيرات في الحجم. في حالة طوب السيليكا هدف هام آخر من التسخين هو لتحويل الكوارتز إلى الكريزتوباليت أو تراي ديمايـت والتـي هـي النظائر للسيليكا الأكثر ثباتا. عند عدم حدوث هذا التغير عند الحرق، فإن الحجم سوف يتغير أثناء الاستخدام ويصبح المنشأ ضعيف. يتم رفع درجة الحـرارة بـبطء في حوالي ٢٤ ساعة إلى حوالي ١٥٠٠ °م والاستمرار عند درجة الحـرارة هـذه لمدة من ١٠ – ٢٠ ساعة تقريبا وذلك ليمكن للكوارتز أن يتحول إلى الكريـزتوباليت والـذي يتحول ببطء إلى التراي ديمايت عند التبريد. المحافظة على

استمرار درجة الحرارة عند ١٥٠٠ °م لمدة أطول يكون مفضلا ولكنه ليس اقتصادي. يتم التبريد بحرص شديد ويستغرق من ١ – ٢ أسبوع. ينتج عن هذا تكون خليط من الترايديمايت والكريزتوباليت.

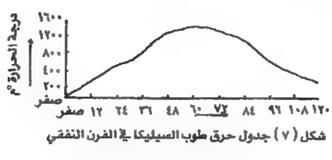
معدل التسخين والتبريد لطوب السيليكا أثناء التحول يجب أن يكون بطيئا جدا. تبريد طوب السيليكا عند درجة حرارة أقل من ٦٠٠ °م يجب أن يكون بطيئا جدا لتجنب تشققه وتقشره. الاختبار المجهري لطوب السيليكا الذي تم حرقه جيدا يظهر فقط التراي ديمايت والكريزتوباليت.

يتم حرق طوب السيليكا في أفران اللهب الهابط (down draught) من نوع الحرق على دفعات (batch type). يتم توفير الغاز الكافي ما بين السقف الطبقة العليا لطوب السيليكا في الفرن كذلك فإنه يتم تجنب الالتصاق القريب للطوب في الفرن وذلك للسماح للتمدد مع التسخين. حرق طوب السيليكا ينتج عنه التخلص من الماء والمواد العضوية الموجودة فيه، وكذلك التزجيج للسيليكات التي تتكون بالتفاعل الكيماوي للجير المحروق (lime) أو القلويات الأخرى مع السيليكا وتحول الكوارتز إلى الترايديمايت والكريزتوباليت. كذلك فإن حرق طوب السيليكا يمكن أن يتم في الفرن النفقي (tunnel kiln).

جدول الحرق لطوب السيليكا في فرن حريق الغاز الهابط ذو المرحلة الواحدة وفي الفرن النفقي موضح في الأشكال (٣/٦)، (٣/٧).



شكل (٦) جدول حرق طوب السيليكا في الفرن النفقي بتيار الغاز الهابط



شكل (٧) جدول حرق طوب السيليكا في الفرن النفقي

شكل (٣/٧)

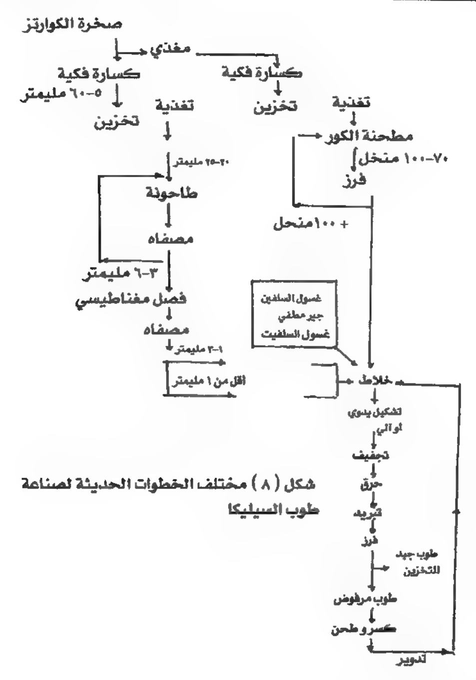
الخطوات المختلفة في الطريقة الحديثة لصناعة طوب السيليكا موضحة في الشكل(٣/٨).

الخواص:

طـــوب الـــسيليكا يكون له لون أصفر مع بقع صغيرة بنية اللون موزعة خلال الكتلة.

المسامية هي حوالي من ٢٢ – ٢٦% والوزن النوعي هو ٢,٣ إلى ٢,٣٥.

الخاصية الهامة هي أن الكوارتيزيت يتحول إلى ترادميايت عند ٨٧٠ °م والذي يتحول إلـــى كريـــزتوباليت عند ١٧٤٠ °م، كل من هذا له أشكال الفا و بيتا و أوزان نوعية مختلفة. يمكن تلخيص التغيرات كالآتي:



شكل (٨) مختلف الخطوات الحديثة لصناعة طوب السيليكا

الوزن النوعي ٢,٦٥ ٨٧٠ °م ٢,٢٦ ١٤٧٠ °م ٢,٣

المادة الأصلية (allotrope) الكوارتز → الترايديمايت → كريزتوباليت

لـــذلك فـــإن تحول الكوارتز إلى التراديمايت يسبب زيادة في الحجم حوالي ١٧,٢ % والكوارتز إلى الكريزتوباليت إلى ١٤,٣%. التمدد الطولي لطوب السيليكا أثناء الحرق

(بسبب هذه التحولات) هو ٣,٥%. لذلك فإنه في حالة حرق طوب السيليكا وعدم تحول الكوارتز إلى التراي ديمايت والكريزتوباليت فإن الطوب سوف يتمدد عند الاستخدام في الأفران وسوف يسقط المنشأ.

تأثير الكيماويات:

السيليكا لا تتأثر بأي أحماض عدا حامض الهيدروفلوريك وحامض الفوسفوريك. حامض الهيدروفلوريك يتفاعل مع السيليكا في درجة الحرارة العادية وحامض الفوسفوريك عند ٤٠٠ °م. المركبات القلوية والقاعدية تتفاعل مع طوب السيليكا عند درجة الحرارة المرتفعة مكونة سيليكات معقدة قابلة للانصهار.

القلويات تتفاعل مع السيليكا الحرارية، وخاصة عند درجة الحرارة العالية مكونة سيليكات معقدة قابلة للانصهار.

الكربون يتفاعل مع السيليكا عند درجة الحرارة المرتفعة، أكبر من ١٢٠٠ °م مكونا سيليكون وأول أكسيد الكربون وفي بعض الحلالات يتكون كربيد السيليكون كذلك.

تأثير الحرارة على السيليكا:

عند تسخين السيليكا الحرارية فإنه تحدث فيها التغيرات التالية:

- عند التسخين إلى ٥٧٥ °م فإنه يتكون كوارتز بيتا (B – quartz) .
- عند التسخين إلى ٨٧٠ °م يتكون (B – tridymite)
- عند التسخين إلى ١٤٧٠ °م يتكون (B – cristobalite).

الكريزتوباليت الذي هو مستقر إلى حد ما يميل إلى التحول إلى تراي ديمايت في حالة التسخين ما بين ١٤٧٠ إلى ١٥٠٠ °م باستمرار لمدة طويلة. عند التبريد كل التغيرات السابقة تحدث في الاتجاه العكسي حتى ٢٧٠ °م.

وأقل من ٢٧٠ °م تحدث التغيرات التالية:

- من ٢٧٠ °م إلى ١٨٠ °م تتحول (B – cristobalite) إلى الشكل α (ألفا)
- من ١٨٠ °م إلى ١٥٠ °م يتحول (B – tridymite) إلى الألفا ثم ببطء شديد

إلى الكوارتز.

التبــريد مــن ٢٧٠ °م إلــى درجة حرارة الجو يصاحبه تغير كبير في الحجم وهناك خطورة من التشقق والانهيار، لذلك فإن هذا التبريد يتم ببطء شديد.

التغير في الحجم عند تسخين السيليكا الحرارية:

التغيــر في الحجم عند تسخين السيليكا الحرارية يعتبر هام جدا ذلك لأن ثبات الــسيليكا الحرارية يتوقف على هذا التغير في الحجم عند التعرض للتغير المفاجئ في درجــة الحرارة. هذه التغيرات في الحجم تعود إلى التغيرات الأصلية التي تحدث في السيليكا. هذه التغيرات تحدث تغيرات في الوزن النوعي والذي بالتالي يسبب تغيرات في الحجم.

التغير من α إلى B للكوارتز من ٢٠٠ إلى ٥٧٥ °م يصاحبه تغير في الحجــم بنسبــة (١٤%) بالزيادة.

عند ٨٧٠ °م وعند تكون بيتا تراي ديمايت (B – tridymite) فإنه تحدث زيادة في الحجم من ١٤% إلى ١٦%.

عــند تحول السيليكا إلى الكريزتوباليت أي بتسخين السيليكا الحرارية حتى ١٤٧٠ °م مــن درجــة حرارة الغرفة فإن ذلك يصاحبه زيادة ٢٠% في الحجم وخفض الوزن النوعي من ٢,٦ إلى ٢,٢٣.

معامل التمدد الحراري من ١٥ ° إلى ٩٤٠ °م هو حوالي ٠,٠٠٠٠٠٠٥١ بوصة لكل ١ °م للبوصــة بينما معامل التمدد من ١٥ °م إلى ١١٨ °م يكون بمتوسط ٠,٠٠٠٠٠٦٤ بوصة لكل ١ °م.

المقاومة الحرارية (Refractoriness)

أفــضل أنواع السيليكا الحرارية له نقطة ليونة من ١٧١٥ إلى ١٧٦٠ °م. تتوقف المقاومة الحرارية على الآتي:

- نسبة الجير، الصوداء البوتاس الموجودة في الحراريات.
- شكل وبناء الحراريات.

- طريقة ومدى الحرق.

القدرة الحرارية تحت الأحمال:

طـــوب السيليكا عند التسخين تحت أحمال ٣,٥ كج/ سم٢ فإنه ينهار عند درجة حرارة ما بين ١٣٥٠ إلى ١٤٧٠ °م. وتحت أحمال ٢ كجرام/ سم٢ فإن القدرة الحرارية تحت الأحمال تتغير من ١٦٥٠ إلى ١٦٩٠ °م طبقا للمكونات الكيماوية.

أقصى درجة حرارة تشغيل لطوب السيليكا تحت الأحمال هي عادة ١٦٨٠ °م عند ٣ كج/ سم٢.

القوة الميكانيكية:

القـــوة الميكانيكـــية تتغير من ٢٥٠ – ٤٥٠ كجرام/ سم٢ طبقا للمكونات. إجهاد الكسر لطوب السيليكا يتناسب مع نعومة الكوارتز المستخدم، نسبة الماء المضاف لعمل العجينة ونسبة مادة الربط المضافة.

التشقق والتقشف (Spalling):

التغيـــر المفاجئ في درجة الحرارة يحدث تشققات شعرية في طوب السيليكا وهذا يسبب التحلل أو الانهيار. ويرجع ذلك إلى الأسباب الآتية:

- حدوث تشققات في الحراريات إذا كان التحول من الكوارتز إلى الكريزتوباليت أو إلى التراي ديمايت غير تام وأن هذا التحول يحدث مفاجأة بسبب الارتفاع الـــسريع فـــي درجـــة حرارة الحراريات. هذا النوع من التشقق يمكن تجنبه بتكـــرار رفع درجة الحرارة للحراريات بمعدل بطئ حتى ٨٠٠ °م ثم التبريد البطئ.
- يمكن أن يحدث هذا التقشف بسبب عدوانية الخبث.
- تـــوجد إجهـــادات عـــند تبـــريد طوب السيليكا أقل من ٢٥٠ °م بسبب تحول الكريزتوباليت.

عموما، يمكن خفض هذه العيوب في السيليكا الحرارية باتباع الوسائل الآتية.

- بتكرار التسخين للحراريات حتى ٨٠٠ °م ثم التبريد ببطء. بهذا فإن الكوارتز يتحول إلى تراي ديمايت وليس الكريزتوباليت.
- باستخدام حراريات ذات حبيبات خشنة.
- بزيادة المسامية وخفض الكثافة.

التوصيل الحراري:

التوصـــيل الحـــراري للـــسيليكا الحـــرارية أعلـــى منه بالنسبة لطوب الطفل الحـــراري. فهـــو يتراوح ما بين ٠,٠٠٣ إلى ٠,٠٠٤ كالوري/ سم/ ثانية عند درجة حرارة من ٧٠٠ ° إلى ١١٠٠ °م.

الحرارة النوعية :(Spacific Heat):

هي حوالي ٠،٢٦.

خواص طوب السيليكا الحراري الجيد :

النوعية الجيدة من طوب السيليكا يجب أن يكون بها الخواص الآتية :

- المقاومة الحرارية يجب أن تكون مرتفعة حتي ١٦٩٠ °م.
- نسبة السيليكا يجب أن تكون مرتفعة ما أمكن ذلك وأن نسبة الأكاسيد الأخري يجب أن تكون منخفضة جدا .
- يجب أن يكون له إجهاد كسر مرتفع .
- عند الإستخدام يجب ألا يكون هناك أي تغير في الحجم ما أمكن ذلك .
- يجب أن يتم حرقه إلي الحد أن يكون له إجهاد شد مرتفع في حالة السخونة .
- يجب أن يكون التشقق أقل ما يمكن عند التعرض للتغير المفاجيء في درجة الحرارة.

خواص بعض أنواع طوب السيليكا الحراري موضح في الجدول التالي :

نوع طوب السيليكا المستخدم	أقصي نسبة% ل SiO_2	أقصي نسبة% ل CaO	أقصي نسبة% ل $Al_2O_3+TiO_2$	أقصي نسبة% ل Fe_2O_3	المقاومة الحرارية م°	القدرة الحرارية تحت حمل ٢ كجم/سم^2	المسامية %	الكثافة مم/سم^3	اجهاد الكسر كجم/سم^2	التغير الطولي الثابت عند ١٤٥٠م° لمدة ٢ ساعة
الأغراض العامة	٩٤	٢,٧٥	١,٥	١	١٦٨٥م°	١٦٧٠م°	٢٥	١,٩-١,٨	٣٠٠-٢٥٠	١+
فرن الكوك	٩٤	٢,٢٥	١,٥	١,٥	١٦٨٥م°	١٦٥٠م°	٢٤-١٧	١,٩-١,٧	٣٠٠-٢٥٠	٠,٤+
اداء متفوق(كما في حالة سقف فرن الزجاج)	٩٣	٢	٠,٥	٠,٥	١٦٨٥م°	-	٢٤	١,٩-١,٧٥	٤٠٠-٣٠٠	١+
سقف الفرن	٩٤	٢,٥	١,٥	١	١٦٨٥م°	١٦٥٠	٢٤	١,٧٥-١,٧	٣٠٠-٢٥٠	١+
محول بسمر ومعرفة نقل مصهور الصلب	٩٤	٢,٥	١,٥	١	١٦٨٥م°	١٦٥٠	٢٤	١,٧٥	٣٠٠-٢٥٠	٢+

استخدامات السيليكا الحرارية :

طوب السيليكا يتمدد مع التسخين . لذلك فإن حراريات السيليكا مفيدة في الأغراض التالية:

- حيث لا يكون مطلوب أي انكماش في الحراريات كما في حالة حوافي فرن الكوك .
- حيث يكون المطلوب مقاومة عالية للحرارة .

تستخدم السيليكا الحرارية في تبطين الأفران وفي الأسقف والعقود والأجزاءالعليا للأفران، أي في الأجزاء الأكثر سخونة في الأفران .

بسبب التوصيل الحراري العالي لحراريات السيليكا ، فإن طوب السيليكا يستخدم عالميا في بناء أفران الكوك وذلك في حوائط الفرن ، التجمعات العلوية للغازات العادمة ، وسقف الفرن وكذلك الجزء السفلي للفرن .... إلخ .وفي صناعة الزجاج ، يستخدم طوب السيليكا في سقف وأجزاء الحرق للأفران . بسبب المقاومة الممتازة لإجهادات الضغط عند درجة الحرارة العالية ، فإن سقف وأعمال تحديد المقدار والإتجاه للفح الفرن الساخن (في فرن اللفح) يتم تبطينها بطوب السيليكا عالي الكثافة وله معامل مساحة سطحية كبير حيث درجة حرارة الموقد تظل مرتفعة خلال كل عملها وأنه لايوجد اختلاف في درجة حرارة السقف (القبو) أثناء فترة دخول الغاز ودخول اللفح في المواقد . بسبب خواص ملاءمتها العالية عند درجات الحرارة العالية والاداء الجيد عند درجات الحرارة العالية ، فإن طوب السيليكا يستخدم في أسقف فرن المجمرة المكشوفة (Open Hearth) إلي جانب العقود والأسقف والأجزاء العليا لمختلف الأفران.

الطوب الشبه سيليكا :(Semisilica Bricks):

الطوب الشبه سيليكا هو المصنوع من سيليكاتية ذات محتوي من السيليكا من ٧٥ إلي ٩٢ % .وهي تصنع بطريقة تشبه لطريقة طوب السيليكا ، وهي أقل في السعرويستخدم حيث ظروف التشغيل لا تتطابق مع طوب السيليكا العالي السعر .

رغم المقاومة الحرارية الأقل ، فإن الطوب الشبه سيليكا له مقاومة جيدة بالنسبة للتشقق والتقشف أفضل من طوب السيليكا . يستخدم طوب شبه السيليكا كطبقات ضهارة لطوب السيليكا في افران الكوك ، وأسطح الأفران ... إلخ . كما أنه يستخدم كذلك في إنشاء أسقف أفران إعادة التسخين ، غرف المسترجعات ، وأبواب الفرن..ألخ وحيث يكون المطلوب التزاوج بين المقاومة الحرارية ومقاومة الخبث والتشقق .

الحراريات عالية الألومنيا : (High Alumina Refractories)

حراريات هذه المجموعة : لا تستخدم بكثرة بسبب ارتفاع سعرها . كقاعدة عامة فإن المقاومة الحرارية تزداد بزيادة المحتوي من AL_2O_3 لحراريات سيليكات الألومنيوم (Aiumino Silicate Refractories) مقارنة بالطفل الحراري ، فإن حراريا الألومنيا العالية توفر خدمة أفضل في الظروف الحادة وذلك بسبب مقاومتها العالية للإحتكاك والبري ومقاومة الخبث والتشقق ، والثبات الحجمي الجيد ، المقاومة الحرارية العالية ، الطاقة الأعلا للأحمال . المحتوي من الألومنيا في الحراريات عالية الألومنيا يتراوح مابين ٤٥% إلي ٩٥% . مكونات بعض المواد عالية الألومنيا المستخدمة في تصنيع تلك الحراريات هي كالآتي :

المكونات النسبة%	نوع المواد عالية الألومنيا			
	Kyanite	Sillimanite	Bauxite	Diaspore
Al_2O_3	٥٨-٦٢	٦١	٥٨-٦٢	٦٤
$Si\,O_2$	٣٤-٣٧	٣٦,٥	١,٢-٢	٢٥
Fe_2O_3	٠,٣-٠,٨	١,١	١,٤	٠,٧٥
$Ti\,O_2$	٠,٨٨-١	٠,٧٥	٣,٤	١,٢
$Ca\,O$	صفر	٠,٦	صفر	صفر
الفقد عند الرق	٢,٣-٣,٣	-	٢٥-٣٠	٩

نقطة الإنصهار لكل المواد عالية الألومنيا السابقة هي أكثر من ١٨٠٠ ^{o}م والمحتوي من القلويات باستثناء (Cao) معدوم تقريبا .

المواد الخام للطوب الحراري عالي الألومنيا والذي يكون مترابط كيماويا أو بواسطة السيراميك (Ceramic Bonded) يتم غالبا تحميصها المسبق لتحقيق إنخفاض الإنكماش عند الحرق . لتشكيل الخليط يتم الضغط الجاف عادة للمواد عالية الألومنيا والجروح (Grog) [الجروج : هو كسر أو هالك الطوب الحراري عالي الألومنيا] ، كذلك يستخدم التشكيل اليدوي أو الضغط الهوائي (Pneumatic Ramming) للحصول علي بعض الأشكال الخاصة . الطوب الحراري عالي الألومنيا يمكن أن تكون مادة الأساس فيه هي (Bauxite ، Sillimanite ،Mullite أو Corundum) – البوكسيت هو العادي في محتوي الألومنيا الخام وبذا يحسن من المقاومة الحرارية ذلك مع زيادة نسبة الألومنيا إلي السيليكا . ٧٢% ألومنيا في الخليط تنتج حراريات التي يكون بناءها كله من الموليت (muillite) . حرق خليط من البوكسيت أو أي شكل آخر من الألومنيا بالكمية المطلوبة من رمل الكوارتز / الكاولين (المواد الحاملة للسيليكا) ينتج الموليت المخلق .الموليت والألومنيا ألفا هي المجالات الرئيسية الموجودة في حراريات الموليت والتي تكسبها مقاومة عالية ضد التشقق الحراري بالاضافة إلي المقاومة العالية للتآكل وتغير الشكل عند درجات الحرارة العالية . الكيانيت والسيليمانيت (Kynite , Sillimanite) هـي أهـم الحراريـات لهذه المجموعـة وكلاهـما يمـثل بالمعادلـة $(AL_2O_3.Si\ O_2)$. كلاهما يتحول عند التسخين إلي المولايت والسيليكا $(3AL_2O_3\ \partial 2Si\ O_2)$ في حالة الكيانيت فإن هذا التحول يحدث عند ١٣١٠ ^{o}م ويصاحبه زيادة كبيرة في الحجم بينما في السيليمانيت فإن التحول إلي الموليت يحدث عند حوالي ١٦٠٠ ^{o}م بدون أي زيادة ملحوظة في الحجم . لذلك ، فإنه من الضروري التسخين الشديد للكيانيت وتحويله إلي الموليت ثم عمل الطوب وأخيرا الحرق بالطرق العادية . يمكن عمل السيليمانيت مباشرة إلي الطوب والحرق كالعادة . في كلا الحالتين ، يستخدم الطفل اللدن كمادة ربط . بسبب تكون الموليت (Mullite) ،

فإن كلا من الكيانيت ، السيليمانديت يقدروا كحراريات مثالية . الموليت يساهم في المقاومة الحرارية العالية (يمكن استخدامه حتي ١٨٠٠ ^{o}م، المقاومة الحرارية العالية تحت الأحمال ، المقاومة الكيماوية العالية ، ومعامل التمدد المنخفض ، لذلك فإن له درجة عالية من مقاومة الصدمات الحرارية . وهذه تعتبر حراريا متعادلة إلي حد ما ويمكن استخدامها في معظم المجالات . كلا من المادتين والسيليمانيت بالتحديد له مقاومة ميكانيكية . وهي مكلفة ولذلك لا تستخدم بكميات كبيرة .

الخواص:

مع زيادة المحتوي من الألومنيا فإن درجة حرارة الإنصهار للحراريات عالية الألومنيا تزداد . فحرارة الإنصهار للحراريات المحتوية علي ٥٠% ألومنيا هي ١٧٦٣ ^{o}م بينما تلك المحتوي علي ٩٠% ألومنيا هي ٢٠٠٠ ^{o}م.

خواص بعض الحراريات عالية الألومنيا موضحة في الجدول الآتي :

مقاومة الصدمة الحرارية لمعظم الطوب العالي الألومنيا السابق ذكره تعتبر ممتازة .

الإستخدام :

حراريات الكياناميت والسيليمانيت تستخدم علي نطاق واسع في أفران تصنيع الزجاج .

الطوب الحراري عالي الألومنيا يستخدم كذلك في مواقد الفرن اللافح (في جزء القبة)، وأفران الإسترجاع الأخري ، وأفران حرق الجير والأسمنت الدوارة ، سقف فرن القوس الكهربي ، وأفران من الزجاج ، ومغرفة نقل المصهور المسال. بسبب خاصية عدم البلل ، فإن الحراريات عالية الألومنيا المرتبطة كيماويا تستخدم خصيصا في أفران صهر الألومنيا . الرماح المثقبة عالية الألومنيا لنفخ الصلب بالغاز الخامل في المغرفة ولإستخدام مواقد اللفح الساخن للفرن اللافح يتم تبطين حوائطها وأنابيب الهواء بالحراريات عالية الألومنيا من نوع الموليت كورندم (محتويا ما يزيد عن ٧٨% ألومنيا) يتم التصنيع بخلط الكاولين بمادة الشاموت (Chamotte) التي تحتوي علي

مسحوق الألومنيا بحجم حبيبات ١٠ – ٦٠ ميكروميتر ، ثم تشكيل الطوب والحرق عند ١٧٥٠ ^{o}م لمدة ٨٠ ساعة . كتل السيليمانيت (حراري عالي الألومنيا) تستخدم في صناعة الزجاج .

جدول لخواص بعض الحراريات عالية الألومنيا :

نوع الحراريات عالية الألومنيا	AL_2O_3 نسبة %	Fe_2O_3 نسبة %	المقاومة الحرارية ^{o}م	المسامية %
Kyanite Base				
درجة I II II	٥٨–٦٠ ٦١–٦٣ ٦١–٦٣	٠،٥–١ ٠،٥–١ ٠،٥–١	١٨٠٤م ١٨٠٤م ١٨٠٤م	٢٢–٢٥ ٢٢–٢٥ ١٥–١٦
الأساس من المولليت والكورندم درجة I درجة II درجة III	٧٠–٧٤ ٨٤–٨٦ ٩٤–٩٦	٠،٤	١٨٠٥م ١٨٥٠م ١٨٥٠م	١٦–٢٠ ١٨–٢٠ ٢٠–٢٢
أساس البوكسيت درجةI درجة II	68-71 84-68	٢–٢،٥ ٣–٤	١٨٠٤ م ١٨٠٥ م	٢٠–٢٣ ١٨–٢٠

الكثافة جم/سم^3	اجهاد الكسر على البارد كجم/سم^2	التغير الطولي المستمر %		
		%	مْ	الوقت بالساعة
٢,٢–٢,٤	٣٠٠–٤٠٠	٠,٥–	١٥٠٠	
٢,٣–٢,٩	٢٥٠–٣٠٠	٠,٤–	١٥٠٠	
٢,٤٥–٢,٥٥	٥٠٠–٧٠٠	0.5±	١٦٠٠	

الكثافة جم/سم^3	اجهاد الكسر على البارد كجم/سم^2	التغير الطولي المستمر		
		%	مْ	الوقت بالساعة
٢,٤٥-٢,٥٥	٨٠٠-٦٠٠	٠,١-	١٧٠٠	
٢,٧-٢,٨	٨٠٠-٥٠٠	٠,٥-	١٦٠٠	
٣,٥-٣,٦٥	٨٠٠-٦٠٠	0.3±	١٦٠٠	
٢,٦٥-٢,٧٥	٤٠٠-٣٠٠	٢,٥+	١٦٠٠	
٢,٧-٢,٨	٨٠٠-٥٠٠	١,٥+	١٦٠٠	

طوب البوكسيت (Bauxite Bricks) :

البوكسيت هو الخام الذي يستخرج منه معدن الألومنيوم . Al_2O_3 النقي مادة حرارية عالية (نقطة الإنصهار ٢٠١٠ مْ) ولكن البوكسيت العادي يحتوي علي الحديد والسيليكا كملوثات بما يجعل الطوب ينصهر عند ١٠٠٠ مْ ولكن كتل الطوب المعدة جيدا يمكن استخدامها حتي ١٧٥٠ مْ.

بجانب الإحتواء علي أكسيد الحديد والسيليكا ، الذي يعمل علي انخفاض درجة حرارة الإنصهار فإن البوكسيت يحتوي علي ماء التبلر . يتم تسخينه إلي ٦٠٠ مْ لإزالة الماء ويمكن عندئذ استخدامه مباشرة لتصنيع أنواع الطوب المتدينة . عادة درجة حرارة التحميص هي من ١٤٠٠ إلي ١٥٠٠ مْ وهذه تمنع أي انكماش تالي في الطوب. يتم طحن المادة التي تم تحميصها وخلطها بالطفل الحراري اللدن وتشكيلها في كتل ثم الحرق عند ١٥٠٠ مْ.

في الواقع (البوكسيت الذي هو الألومنيا المائية $Al_2O_3.H_2O$ أو $Al_2O_3.3H_2O$ الذي يحتوي علي السيليكا والحديد كملوثات يفقد ما التبلر عند التسخين مابين ٩٠٠ إلي ١١٠٠ مْ وينتج (γ. Alumina) ذات وزن نوعي ٣،٦٥ . عند استمرار التسخين فإنه يتحول إلي الكورندم (Corundum) حيث يصبح الوزن النوعي ٣،٩٩ الذي هو أكثر ثباتا في شكل ألفا ألومنيا (α Alumina) – البوكسيت المستخدم في عمل الطوب

الحراري يجب أن يحتوي علي ألومنيا أكثر من ٥٨% ، SiO_2 أقل من ٥% ، Fe_2O_3 أقل من ٣% ، TiO_2 أقل من ٣% .

خواص البوكسيت الحراري :

الإنكماش:

يحدث انكماش كبير للبوكسيت الحراري حتي عند درجة الحرارة العالية . وهذه سلبية كبيرة . يمكن التخلص من تأثير هذا الإنكماش بعمل الحراري من البوكسيت المنصهر .

التفاعلات الكيماوية :

لأن البوكسيت قلوي فإنه لا يتآكل بالخبث القلوي . ولكن حراريا البوكسيت يتآكل بالجير المطفي . هذه الخاصية لعدم تآكل البوكسيت بالخبث القلوي يجعله متميز علي الطفل الحراري الذي يتعرض لهذه العدوانية .

المقاومة الحرارية:

البوكسيت الحراري أفضل مقاوم من ١٧٩٠ °م إلي ١٨٨٠ °م.

المقاومة الحرارية تحت الأحمال :

البوكسيت الحراري عند التسخين تحت ضغط ٣،٥ كج/سم٢ فإنه يلين عند ١٥٠٠ °م.

أقصي درجة حرارة تشغيل :

البوكسيت الحراري يمكن تسخينه حتي ١٧٠٠ °م – ١٧٥٠ °م.

التشقق و التقشف عادي في البوكسيت الحراري .

القوة المكانيكية :

البوكسيت الحراري له قوة ميكانيكية عالية . البوكسيت الحراري المحتوي علي حتي ٢٥% من الطفل الحراري لا يلين أقل من ١٥٠٠ °م عند ضغط ٣،٥كج/سم٢

مقاومة البري:

إذا تم التسخين الكافي للبوكسيت قبل تحويله إلي الحراري ، فإنه يكتسب مقاومة عالية للبري .

المسامية :

البوكسيت الحراري عالي المسامية وهذا يقلل من قدرة تحمله عند استخدامه في الأفران .

الإستخدام:

يستخدم في عمل قاع محول بسمر القاعدي وأفران المجمرة المكشوفة (Open Hearth Furnaces) ، وبتبطين أفران الأسمنت والأفران الأخري التي تعمل عند درجات الحرارة العالية .

طوب الكروميت (Chromite Bricks)

حراريات الكروميت هي حراريات متعادلة هامة . المادة الخام هي الكروميت $(Cr_2O_3.FeO)$. وهو يحتوي علي $MgO-Al_2O_3$ الذي يعمل كعامل ربط للطوب . محتوي الخام من Cr_2O_3 يتراوح مابين ٣٠ – ٦٠ % ، وجود كمية كبير من السيليكا وأكسيد الحديد يقلل من درجة حرارة الإنصهار ، وهذا غير مطلوب .

خام المكروميت المناسب لصنع الكروميت الحراري يجب أن يحتوي علي مالا يقل عــن ٤٠ % Cr_2O_3 ويجــب أن يكــون صلبا ، وله بناء مجهري دقيق. المكونات المناسبة لخام الكروميت هي:

Cr_2O_3 = ٤٥ % ، أكسيد حديد أقل من ١٨ % ، سيليكاالمغنسيوم ١٠-١٥%، CaO أقــل من ١% ، SiO_2 من ٣-٥% ، منAl_2O_3 ٧-١٠%، TiO_2 والقلويات أقل من ١% .

بعــد التكسير والطحن لخام الكورميت ، يتم خلطه مع الماء ومادة الربط (عادة القــار الساخن حيث المواد العضوية قد تستخدم أحيانا) لتحضير عجينه لدنة . أحيانا

يــتم الخلــط الجــاف . التشكيل اليدوي أو الآلي للطوب يتم تبريده ببطئ لتجنب عدم تجــانس التجفيف وتكون الشقوق . يتم عندئذ حرق الطوب في أفران مستمرة أو ذات الدفعات وينتهي الحرق عند ١٤٠٠ °م.

يجب أن يكون معدل التسخين بطيئا لتجنب الإنتفاخ الذي يمكن أن يحدث تفكك للطوب في الفرن في حالة الرص الملاصق .

الخواص :

طوب الكروميت يمكن استخدامه حتي ١٨٠٠ °م ومقاومته الحرارة تحت التحميل هــي ١٤٣٠ °م عند ٣،٥كج/سم^2. عند درجة الحرارة العادية يكون إجهاد الكسر من ٣٥٠ – ٥٥٠ كــج/ســم^2 . طــوب الكروميت يعتبر مقاوم للخبث القلوي ومتوسط الحموضة ، ولكنه يتأثر بالخبث في الجو المختزل . وهو لا يقاوم الصدمات الحرارية . وله توصيل حراري متوسط .

الكــروميت الحراري ينفجر في وجود أكسيد الحديد . وجود سيليكات المغنسيوم غير مطلوب نظرا لأنها تخفض من القدرة الحرارية .

تخــتلف خــواص طــوب الكروميت طبقا لمكونات خام الكروميت ونوع مادة الربط المــستخدمة . المقاومــة الحرارية لطوب الكروميت ذو المحتوي المنخفض جدا من الــسيليكا يمكن أن تكون مرتفعة إلي ١٩٠٠ °م . ولكن عمليا فإنه نادرا ما يستخدم بعد ١٥٠٠ °م . طــوب الكــروميت الحــراري بمادة الربط الجيرية أكثر مقاومة حرارية مقارنة بمادة الربط من الطفلة . طوب الكروميت المحتوي علي سيليكا زائدة له مقاومة حــرارية منخفضة تحت التحميل ، حيث يسقط عند ١٤٠٠ – ١٤٥٠ °م تحت حمل ٢ كج/سم٢. طبقا للمكونات فإن الوزن النوعي لطوب الكروميت يتراوح مابين ٣،٨ إلي ٤ والمسامية من ٢٤% إلي ٢٧% .

طوب الكروميت المحتوي علي السيليكا الحرة يتشق عند ٢٠٠ – 300°م ولكن مقاومة التشقق لطوب الكروميت الخالي من السيليكا أفضل من حراريات الماجنيزيت والسيلكا

لأن حساسيتها للصدمة الحرارية تزداد بزيادة السيليكا الحرة .

الإستخدام :

يستخدم طوب الكروميت علي نطاق واسع في أفران صناعة الصلب وتنقية النحاس . وهومفيد بالتحديدفي فصل حراريات الأحماض والقلويات وهوجيد في أي استخدام طالما أنه غير معرض للصدمات الحرارية ولكنه مكلف .

طوب الكروميت له تطبيقات كثيرة في صناعة الصلب والمعادن الغير حديدية . فهو يستخدم في قاع حفر السقي لماكينه التشكيل في مصانع الصلب . ولكن إرتفاع سعره يحد من استخدامه .

طوب الكروميت – المجنيزيت

(Chromite – Magnesite Bricks)

سلبيات طوب الكروميت هو انخفاض المقاومة للصدمات الحرارية . لقد أدت الجهود للتغلب علي هذه المشكلة إلي إضافة من ١٠ – ٣٠% من أكسيد المغنسيوم المحروق (Mgo) إلي الكروميت . (في الكروميت – المجنييزيت كمية خام الكروم تزيد عن كمية المجنيزيت ، ولكن في حالة زيادة المجنيزيت يسمي الماجنيزيت–الكروم) . يتم ربط الخليط برباط عضوي (مثل المولاس) وتشكيله في صورة قوالب ثم الحرق عند ١٣٥٠ م° إلي ١٦٥٠ م° . عند درجات حرارة أعلا تحترق المادة العضوية ويتكون رباط سيراميكي .

لأنتاج طوب الكروميت – المجنيزيت القاعدي يتم خلط الكروميت المسحوق مع الماجنزيت المحمص بنسبة ٧٠: ٣٠ في مطحنة الطفلة / أومطحنة الأسطوانة الطرفية مع كمية مناسبة من مادة الربط . المادة يجب أن تحتوي ≤١٨% Cr_2O_3 و≤٣٠% Mgo . القوة الميكانيكية تتوفر إما بإستخدام عوامل ربط كيماوية أو بتحقيق الربط عند الحرق . بعد التشكيل للطوب بالطرق الهيدروليكية أو بالطرق الميكانيكية بإستخدام ضغط ٨٥٠ كج/سم^2 للشكل المطلوب ، يتم التخفيف في ظروف محكمة عند ٦٠ –

٨٠ ْم . بعـد حرق الحراريات الجافة (في أفران نفقية أو ذات الدفعات) عند ١٥٠٠ –١٦٠٠ ْم يتم التبريد البطئ لتجنب التلف والإنهيار .

طـوب الكـروميت المجنيزيت له النوعية الجيدة مثل طوب الكروميت وطوب الماجنـزيت . يمكـن استخدامه حتي ١٧٠٠ ْم ومقاومته الحرارية تحت التحميل هي ١٦٠٠ ْم عند ٢كج/سم^{2}. وهو أكثر مقاومة للصدمات الحرارية عن طوب الكروميت . العيب الرئيسي هو أنه ينتفخ وينفجر في وجود الخبث المحتوي علي أكسيد الحديد .

عيوب طوب الكروميت – الماجنزيت تم خفضها بثلاث تحسينات .

الطـوب المحـسن يعمل بإستخدام الكروميت الخشن المخلوط مع الماجنزيت الدقيق المحمـص واستخدام عامل الربط كيماوي . الماجنيزيت الدقيق يمنع احتراق الخبث ، وبذا يقلل إنفجار الطوب . الرابط الكيماوي يبعد ويوفر من تكاليف الحرق . التحسين الـثالث هو بإستخدام طبقات تبادلية من هذا الطوب مع طبقات من الطوب مغلفة في صـناديق مـصنوعة من ألواح صلب رقيقة – في الإستخدام الحقيقي ، بسبب درجة الحـرارة العالـية فـإن هذه الصناديق تنصهر معا حيث توفر بناء قوي . نظرا لأن الطوب مغلف في صناديق فهذه تعرف ب (Metalcase) .

الخواص:

- اللون: طبقا لكمية الملوثات (اساسا الحديد) الموجودة فإن لون طوب الكروم – الماجنيزيت يتغير من الرمادي إلي البني القاتم .
- الوزن النوعي : وزنه النوعي حوالي ٣،٨ (مقارنه ب٢،٣ لطوب السيليكا) الذي يحتم استخدام منشأ قوي لتحمل الحمل الكلي لهذه الحراريات الثقيلة .
- المـسامية: المسامية الظاهرة لطوب الكروم – الماجنيزيت تتراوح مابين ٢٢ إلـي ٢٦% ولكـن الطـوب الأكثر كثافة يمكن تصنيعه كذلك (بضبط درجة حرارة الحرق والوقت)، ولكن بسبب وزنه النوعي العالي ، فإن فرص انهيار الـسقف بسبب زيادة حمل الطوب تزداد. المسامية الظاهرة لطوب الكروم – الماجنيزيت الذي يتم حرقه لمدة ٥ساعات عند ١٣٥٠ ْم هي حوالي ٢٤% .

- تأثيـــر الخبث : يسبب طبيعته القلوية ، فإنه يقاوم تأثير الخبث القلوي . ولكن إمتصاص أكسيد الحديد يسبب تحلله بسبب تكون مواد إبرية . درجة التحلل لطوب الكروم – الماجنيزيت تتوقف علي مدي الإمتصاص للحديد (في شكل Fe_3O_4) والذي يسبب إجهاد الشد بسبب نمو حبيبات الكروميت الموجودة في الطوب .
- إجهـــاد الكسر علي البارد : إجهاد الكسر لطوب الكروم – الماجنيزيت مابين ٢٥٠كج/سم^2 (للنوع المحروق) إلي ٤٥٠كج/سم^2 للطوب المرتبط كيماويا المستخدم في تبطين الأسقف.
- مقاومـــة التشقق الحراري : رغم أنه أقل من طوب الطفل الحراري ، إلا أن مقاومته للتشقق أعلا من تلك لطوب الكروميت أو الماجنيزيت .
- المقاومـــة الحـــرارية تحت التحميل : (Refractoriness Under Load): مقاومته الحـــرارية أكبـــر من ٢٠٠٠ °م. قيمة المقاومة الحرارية لطوب الكروميت – الماجنيزيت تحت التحميل بحوالي ٢كج/سم^2 تختلف مابين ١٥٣٠ °م بالنسبة لطـــوب الخدمـــه العامة المرتبط كيماويا إلي ١٦٠٠ °م لطوب الخدمة العامة الحـــراري المحـــروق .المقاومـــة الحرارية تحت الحمل لهذا الطوب مناسبة لتبطين الأسقف في أفران – المجمرة المكشوفة (Open Haerth Furnaces) هي حوالي ١٧٠٠ °م والتي هي ٣٠٠ °م أعلا من ذلك لطوب السيليكا تحت ظروف التحميل المشابهة .
- الإســـتخدام : يـــستخدم طوب الكروميت – الماجنيزيت علي نطاق واسع في أفـــران الجمرة المكشوفة الحامضية أو القاعدية في عمل المجمرة (Hearth) ، الأســـقف ، الحـــوائط الجانبية ، المنافذ والفتحات الجانبية – كما يستخدم علي نطـــاق واسع في صناعة الصلب . فهو يستخدم في التبطين الداخلي في أفران صـــناعة الـــصلب القاعدية (مثل المحولات) والحوائط الجانبية في أحواض التشريب أو النقع (Soaking Pits) المستخدمة في تسخين كتل الحديـــد الخـــام

(Ingots) . ولكن يتم تجنب الحراريات المحتويه علي الكروم في نوعية الأفران المنتجة للصلب حيث التقاط كمية صغيرة من الكروم بواسطة الصلب يجعله غير مطابق للمواصفات .

يستخدم طوب الكروم – الماجنيزيت كذلك في محولات النحاس (Copper Converters) وأفران صهر النحاس ، وفي تبطين أفران الحث الكهربي ، والحوائط الجانبية لأفران القوس الكهربي ، محارق أحواض الزجاج والأفران المستخدمة في صهر وإعادة صهر وتنقية الألومنيوم ، سبائك الألومنيوم. في أفران المجمرة المكشوفة القاعدية . يستخدم طوب الكروم – الماجنيزيت في بناء الحوائط الأمامية والخلفية من سقف الباب حتي السقف ، كذلك حوائط كوبري الهواء والغاز تحت الممر المنحدر (Ramp) جملة الحائط إلي مستوي منصة الشغل ثم إلي سقف جيب الخبث ...إلخ .

حراريات الكربون / الجرافيت : (Carbon Graphite Refractories)

الجرافيت هو الشكل البللوري للكربون ورواسبه الطبيعية تكون مخلوطة بمواد كلسية وسيليكونية . الراسب الطبيعي يعرف بالبلمباجو(Plumbago) استخدم الكوك كبديل رخيص للجرافيت ولكنه ليس كافيا مثله .

يوجد الكربون في الطبيعة في الشكل البللوري والغير بللوري . في الجرافيت تكون ذرات الكربون منظمة في إطار سداسي . الجرافيت أقل عرضة للأكسدة مقارنة للأشكال الأخري للكربون الغير بللوري بسبب انخفاض مساميته (أقل من ٥%) . يتراوح محتوي الجرافيت من الرماد مابين ٧،٥ – ١٢،٥ % .

مكونات الجرافيت كالآتي تقريبا :

$,\%28-13 = Fe_2O_3, \%20-12 = Al_2O_3, \%54-42 = SiO_2$

$\%2.6-2.2 = K_2O, \%4.5-1 = CaO, \%8.5-3.5 = MgO$

$\%1.4-0.9 = TiO_2, \%2.5-0.1 = Na_2O$

مادة الربط لحراريات الكربون (المصنوعة من الكوك أو الجرافيت) هي عادة

القطـــران أو القـــار (الخالي من الأمونيا والزيوت الخفيفة) ولكن لين الجير ، الطفل الحراري ، سيليكات الصوديوم ... إلخ يمكن كذلك استخدامها . لإنتاج طوب الكربون الحـــراري يـــتم طحـــن الكوك المحتوي علي أقل من ٨% رماد إلي ١-٢ مليمتر ثم تخزينه في مكان جاف . يتم نشر حوالي ١٠كج من مسحوق الكوك علي أرض نظيفة ثـــم يـــصب القار أو الزفت الساخن عليه . يتم الخلط بالكوارتيك سريعا للحصول علي خليط متجانس مع تجنب تكوين كتل .يتم بعد ذلك تشكيل الخليط في قوالب من الخشب أو مـــن الحديد والتي يتم تزييتها قبل الإستخدام . بعد إزالة المادة الزائدة (بسيخ حديد ســـاخن) ، يـــتم تبريده ثم رفع القالب إلي أعلا تاركا الطوب علي طاولة القاعدة . يتم تبريد الطوب في غرف مهواه . لا يتم تعريض الطوب لضوء الشمس الذي يعمل على ليونه القار ويعيق التصلب للأشكال .

لأنتاج منتجات فائقة ، يتم معالجة الجرافيت بعد الطحن بحامض الهيدروكلوريك لإزالـــة الملـــوثات المعدنـــية . يـــتم الخلط مع مادة ربط مثل الطفل اللدن ، سيليكات الـــصوديوم أو القار ثم التشكيل . طوب الكربون المستخدم كثيرا يصنع من الكوك ذو المحـــتوي المـــنخفض جدا من الرماد ويستخدما القار كمادة ربط . أثناء الحرق ، يتم تقلـــيل الألتصاق بين الهواء والطوب الحراري إلي أدني حد بملئ الفراغ بين الطوب بخليط من الرمل ومسحوق الكوك .

حـــرق حـــراريات الكربون يتم بدون الألتصاق مع الهواء في فرن التيار السفلي المحكـــم ضـــد دخـــول الهواء . يتم تعبئة الطوب الجاري حرقه مع خليط من الرمل والكـــوك في دواليب الفرن لمنع تشويهها أثناء التسخين الأولي .في الفرن يتم التسخين الغير مباشر ويبطئ إلي ٢٥٠ °م التي عندها يتحول القار إلي الكوك والحراريات تجمد . أخيرا يتم زيادة الحرارة إلي ١٣٠٠ °م واستمرارها لمدة ٥٠ -٧٠ ساعة التي عندها يتم إكمال حرق الطوب . يتم عندئذ تبريد الفرن ببطئ شديد حتي درجة حرارة الغرفة ثم يتم فتح الفرن وتفريغه . زمن التبريد يساوي تقريبا زمن التسخين . إجمالي الدورة الـــزمنية من الحرق الأولي إلي فتح الفرن هي حوالي ٢٠٠ -٢٢٠ ساعة. الحراريات

التي بها عيوب يتم طحنها وإعادة إستخدامها .

الطفلة الحرارية التي يتم تغطيتها بالقار أو رواسب الكربون عليها ، في ظروف محكمة تستخدم كذلك – الكربون يزيد من مقاومتها ويزيد من عمر استخدامها .

الأشكال الحرارية من خليط الجرافيت والطفل الحراري يتم بنفس الطريقة كما في الكـوك ، ولكـن ، يـتم تنقـية الجرافيت (لإزالة المراد السيليكونية والكلسية) قبل الإستخدام بالطحن والغسيل أو بطفو الزبد والرغاوي .

الجـرافيت المنقـي يتم عندئذ خلطه مع الطفل الحراري بنسبة ١٥ – ٢٥ % .

طوب الطفل الحراري الجرافيتي يتم إنتاجه بنقع الطفل الحراري في القار الساخن .

القـار المنصهر يملأ مسام هذه الحراريات . الحراريات التي تم نقعها في القار عـند التـسخين البطـئ إلـي ٢٥٠ °م في جو إختزال تتحول إلي الجرافيتية بترسيب الكربون علي أسطح المسام بقدر حدوث الإختراق داخل الطوب .

<u>الخواص:</u> الجرافيت لا ينصهر ويتسامي (Sublimes) عند ٣٦٠٠ °م وهو لا يتأثر بأي نـوع من الخبث أو كيماويات ولكن في وجود الأكسجين عند درجات الحرارة العالية فإنه يتأكسد . وهو مقاوم للصدمات الحرارية وله قدرة توصيل حراري وكهربي عالية مسامية الكربون الحراري تتراوح مابين ٢٠ إلي ٢٥% والوزن النوعي من ١،٥ إلي ١،٩ . ولونه رمادي فاتح ويعطي صوت رنين عند التصادم.

المقاومة الحرارية لهذا الطوب عالية جدا ولا يحدث لها أي تغير في الشكل تحت التحميل حتي ٢كج/سم٢ وعند ١٧٥٠ °م . إجهاد الكسر علي البارد لحراريات الكربون هي حوالي ٣٥٠كج/سم ^{2}.

نظـرا لأن كـتل الكربون لا تبتل بالمصهور، فإن استخدامها في فرن المجمرة المكـشوفة يمـنع تكون القشور المعدنية في حالة تبريد فرن المجمرة المكشوفة وبذا يساعد في تنظيم عمله . ولكن حراريات الكربون تتأكسد وتحترق عند التعرض للهواء مع التسخين .

الإستخدام:

الطـــوب الكربوني له أكبر استخدام في تبطين المجمرة (Hearth) ومستدق الفرن العالـــي بـــين قطـــرية الأكبر والأصغر (Bosh) ، كما يستخدم كذلك في أفران أخري ومعدات أخري حيث تكون درجة الحرارة مرتفعة والجو غير مؤكسد .

كـــتل الكربون الحرارى تستخدم في تبطين مجمرة الفرن العالي (بسبب قدرتها علي تحمل الحرارة والأحمال والعدوانية الكيماوية أثناء صنع الحديد)،وحوائط مستدق الفـــرن العالي ، وكذلك المجمرات البديلة . بسبب وجود جو إختزالي في الفرن العالي فإن عمر الخدمة للكربون الحراري يمتدبسبب إنخفاض أكسدة المعدن إلي إدني حد في هـــذا الفرن . التوصيل الحراري العالي للبطانة من الكربون تساعد في سهولة التحكم فـــي درجـــات الحرارة في الجزء السفلي من الفرن العالي . كذلك يتم تبطين مسارات الحديـــد والخبث بالكربون الحراري والذي يعمل بأبعاد دقيقة نظرا لأنه ينكمش بدرجة صـــغيرة جـــدا . تستخدم الأشكال المموجة (Corrugated) لتوفير وصلات قوية غير مسامية والتي تمنع إختراق المعدن ، الخبث ، تفكك الوصلات وطفو كتل الكربون .

الطـــوب الحراري الجرافيتي (الذي ينتج بنقع الطفل الحراري في القار الساخن عند ١٥٠م لمدة ٢٤ساعة يليه التسخين البطئ في جو إختزالي حتي ٢٥٠ °م بما ينتج عـــنه الـــتحول الجرافيتي (Graphitization) . مفيد في الأماكن الأكثر عرضة لعدوانية الخـــبث (إما بسبب درجة الحرارة العالية للسبك أو بسبب المكون الكيماوي للمعدن ، الخـــبث) مـــثل السدادات ، الفتحات الصغيرة (Nozzlas)، ومغرفة المعدن المنصهر. تستخدم الكربون كمخلوط للدك مع القار لبناء الخلايا الإليكتروليتية مثل خاصية إختزال الألومنـــيوم .طـــوب الكـــربون الحـــراري المنقوع في القار له مقاومة جيدة للأكسدة وعدوانية الخبث ، إجهاد الضغط العالي ، إنخفاض المسامية ونفاذية الغاز (بسبب قفل المسام) مقارنة بذلك الذي لا يتم سقيه في القار .

استخدام التبطين بدمك الكربون في التعبئة يؤكد انتقال حراري أفضل لأسطح مياه التبـــريد فـــي الأفـــران العالـــية بمـــا ينتج عنه إنخفاض درجة حرارة الوجه الساخن

للحراري. يستخدم الكوك مع رابط من القار كمادة ملئ في الفرن العالي مابين التبطين بالكـربون وألـواح التبـريد وكـذلك مابين التبطين بالطفل الحراري وغلاف الفرن الخارجي .

تستخدم بوتقات الجرافيت ذات الأحجام المختلفة (ذات مسامية ظاهرية من ٣٠ – ٤٠ % وكثافة كلية من ١،٤ إلي ١،٥ جرام/ سم٣ طبقا للحجم) لصهر الحديد الزهر ، الألومنيوم ، النحاس ، النحاس الأصفر ....إلخ .

نـوع آخر جديد لحراريات الكربون الذي يسمي حراريات السيراميك الجرافيتي مـثل جرافيت المجنيزيا وجرافيت الألومنيا تستخدم في عمليات صناعة الصلب بسبب مقاومتها العالية للتشقق وتأثير الخبث القلوي عند درجات الحرارة العالية مع إنخفاض إستهلاك حراري معين .

طـوب الألومنيا الجرافيتي يستخدم في البوابة المنزلقة ونظم السبك المستمر في شـكل أنابيب صب ، ألواح منزلقة وفتحات صغيرة ....إلخ .المجنيزيا الجرافيتي هي حـراريات لها مسامية أقل من ١٠% وهي حاليا تستبدل حراريات الألومنيا سيليكيت لتبطـين مغـارف الصلب المنصهر المستخدمة كأواني المعالجة الثانية لأنتاج الصلب عالي الجودة . .

مكـونات طوب المجنيزيا الجرافيتية الحرارية هي C = 2-20%، CaO =2.2-2.4%، $SiO_2 = 0.7 - 1.5\%, Fe_2O_3, Al_2O_3 = 0.3 - 0.4\%$

بعد التلوين مابين ٣٢٣ – ٦٣٣ كج/سم 2 . الكثافة الكلية بعد التكويك والتلدين هي من ٢،٧٦ – ٢,٩٩ ، ٢،٨ – ٣،٠٤ علـي التوالـي . طوب المجنيزيا الجرافيتي يستخدم كثيـرا فـي أفران القوس الكهربي عالية الطاقة وأفران الأكسجين القلوية بسبب نقطة الإنصهار العالية ومقاومة الخبث القلوي .

حراريات المجنيزيت كروم (Magnesite Chrome Refractones)

التصنيع :

طوب المجنيزيت الكروم يصنع من خليط من خامات المجنيزيت والكروم ، يكون

المجنيــزيت هــو النسبة الغالبة في الخليط – تستخدم الطفلة او القار أو مادة عضوية كمــادة رباط (مثال العسل الأسود) . أدني نسبة من الماجنيزيت (Mgo) ، الكروميت (Cr_2O_3) فــي الخلــيط تختلف مابين ٥٥% ، ٦% (في حالة للطوب الحنمة العامة المحــروق أو بمادة الربط الكيماوية) إلي ٦٥% و١٠% (في حالة الحراريات ذات الــرباط الكيماوي لتبطين الأسقف) . السيليكا في حراريات المجنيزيت كروم ويسمي كــذلك (Mag – Chrome Bricks) يجــب أن تكــون أقــل من ٥% نظرا لأنها تقلل من المقاومــة الحرارية . في حالة طوب المجنيزيت – الكروم المحروق ، يتم الرباط مع الحرق للقوالب الحرارية التي تم تشكيلها ، بينما في حالة الربط الكيماوي للطوب ، فإن مــادة الــربط تقــوم برباط الحبيبات والصلابة بسبب التفاعل الكيماوي مابين المادة الحــــرارية ومــــادة الــــرباط . اســـتخدام مــــواد الـــرباط (مـــثل $Na_2CO_3, MgSO_4, K_2CO_3, MgCl_2, BaSO_4, H_2SO_4$ ، ســـيليكات الـــصوديوم ، الكــرومات ، الأورثوســيليكيت) وهــذه لها أدني حدود لتجنب تأثيرها السلبي علي خواص أخري للطوب الحراري .

نمـــوذج لموكــونات كتلة المجنيزيات كروم (والتي تستخدم بعد النضج (Aging) لتبطين أفران الحث الكبري المفتوحة التي تنتج سبائك شديدة التماسك) ، هي كالآتي :

$MgO = 56\%, Cr_2O_3 = 14\%, Fe_2O_3 = 6.5\%$

$Al_2O_3 = 4.5\%, SiO_2 = 5\% FeO = 1\%$

$CaO = 3\%, MnO = 0.5\%, TiO_2 = 0.25\%$

$K_2O = 0.25\%$

الــتجاوز فــي الحجم هو ± ١٥% يسمح به في طوب المجنيزيت – الكروم لتغطية التغيرات في الأبعاد بسبب الإنكماش أو الإعوجاج أثناء التصنيع .

الخواص:

طوب المجنيزيت – الكروم له تقريبا نفس الخواص لطوب الكروم – الماجنيزيت .

المسامية (Porosity):

المسامية الظاهرة لطوب المجنيزيت – الكروم تتراوح مابين ٢٣%(لطوب الربط الكـيماوي لتبطـين الأسقف) إلي ٢٤% (للطوب الحنمة العامة بالربط الكيماوي أو بالحرق) .

المقاومة الحرارية تحت الأحمال :

أدنـي مقاومة حرارية تحت الأحمال هي ٢كجرام/ سم^2 لهذا الطوب عند درجة حرارة ١٥٥٠ °م.

مقاومة التشظي بالجسيمات (Spalling Resistance):

طـوب المجنيـزيت – الكـروم لـه مقاومة تشظي أفضل من طوب الكروم – المجنيـزيت ، ولـذلك فإنـه اسـتخدم بدلا من طوب السيليكا لتبطين الأسقف لأفران المجمـرة المكـشوف (Open Hearth Furnance) وكذلك طوب الأفران الأخري حيث يعطي عمر أطول ودرجة حرارة استخدام أعلا . هذا الطوب يتحمل ٢٠ دورة حرارية علي الأقل .

إجهاد الكسر علي البارد :

يتـراوح إجهـاد الكـسر علـي البارد لطوب المجنيزيت – الكروم مابين ٢٥٠ كجـرام/سـم^2 (لطـوب الحنمة العامة المحروق إلي ٤٥٠كج/سم^2 لطوب الرباط الكيماوي المستخدم في تبطين أسقف الأفران .

التغير في الطول:

التغير في الطول لهذا الطوب من نوع الحنمة العامة عند ١٦٠٠ °م لمدة ساعتين يتـراوح عـند أقـصاه مابـين 0.5 % (للطوب المحروق) إلي ١% لطوب الربط الكيماوي

مقاومة فعل الخبث : (Resistance Toslag Action):

طـوب المجنيـزيت – الكـروم له مقاومة ممتازة للخبث القلوي وأكسيد الحديد،

ولكــن، وجــود زيادة من F_2o في الخبث يسبب إتلافه وذلك يسبب النمو علي حساب التمدد الذي يحدث لأن F_2o يمكن أن تمتص في طول الحبيبات الخشنة بسبب الخاصية الـشعرية وذلك قبل التلف الحقيقي للحراريات . الحراريات ذات المحتوي العالي من F_2o يمكــن كــذلك أن تنمو بسبب ترسيب الكربون وبذا تتفتت بسبب إنخفاض مقاومة التشظي (Spalling) والتقشف والذي تزداد بسبب وجود كميات عالية من Cao . ولذلك فإن طوب المجنيزيت – الكروم يجب أن يكون محتواه منخفض من CaO, Fe_2O_3 وأن يكون استخدامه فقط للخبث القلوي المحتوي علي نسبة قليلة من F_2o.

الوزن النوعي العالي والمعامل العالي للتمدد الحراري يجعــل الأفــران المقوسة (Arched Furnaces) ذات الأســقف المبطــنة لطوب المجنيزيت – الكروم لها حساسية لإرتفاع وإنخفاض والتغيرات في درجة الحرارة منتجه تشققات وبذا يحد من استخدامها تحت ظروف التغيرات في درجات الحرارة .لذلك فإن مثل هذه الأفران تظل باستمرار تحــت التــسخين بالغاز حتي في حالة إعداد مجمرة الفرن وأي إصلاحات أخري بين عمليات سحب المصهور وعملية إعادة التغذية بشحنة الخام .

الإستخدام :

يستخدم طوب المجنيزيت – الكروم في تبطين السقف المائل لمآخذ سحب الهواء ، أسقف جيوب الخبث ، أسقف البوابات ، مآخذ سحب الغاز ، الحوائط الأمامية والخلفية، مناطق الحرق ... إلخ في أفران المجمرة المكشوفة. بسبب المقاومة العالية للتآكل بفعل أكــسيد الحديــد ، فإن هذا الطوب يستخدم في أحواض السقي (Soaking Pits) ، أفران إعــادة التــسخين ، والأفران الكهربية لصناعة الصلب ، وأفران الأسمنت ، وتبطين أسقف الأفران العاكس (Reverberatory furnces) المستخدمة في صهر النحاس.

الطــوب المجنيزيت – الكروم بالربط المباشر (المحتوي علي الكروميت وعلي المغنسيا الطبيعية – (Periclase) تستخدم في تبطين معدات سحب الغازات من الصلب بالتفريغ .

استخدام آخر لطوب المجنيزيت – الكروم هو في الشكل المغلف بالمعدن (Metal Case). هـذه الحراريات المغلفة بالمعدن ، والتي لها قوة ميكانيكية عالية بما تقلل من مـشاكل الـتداول والكـسر تـستخدم كثيرا في إنشاء السقف المعلق لأفران المجمرة المكـشوفة (Open Hearth) وكـذلك فـي الأفـران الكهربية لصهر الصلب . الطوب بـالغلاف المعدنـي (أي المحروق أو الرباط الكيماوي في غلاف من شرائح الصلب الكربوني) عند الإستخدام في بناء سقف الفرن يتم وضعه بالتبادل مع طوب حراري غير مغلف في المعدن . الغلاف من الصلب مع التسخين يتأكسد مكونا شعيرات أو فتل (Spinal) من الفيرومغنسيوم (عند التفاعل مع الكروميت والمجنيزيت) التي تنصهر عـند ١٦٠٠ °م بما ينتج عنه رباط للطوب وتكون سطح غير مسامي له مقاومة عالية لـتآكل الخبث المنصهر وكذلك للغازات المحملة بالأتربة . يتم الحرص من التمدد مع التـسخين وذلك بالإنحناء البسيط لأغلفة الصلب وبذا يحسن من المقاومة ضد التشظي لهذا الطوب .

تبطين أفران المجمرة المكشوفة بإستخدام المجنيزيت والكروميت الملبد ومركبات المـلاط الأسـمنتي (Guniting) المحتوية علي السيليكا كمادة رابطة تساعد في خفض الفترة الزمنية للتوقف للأصلاح وزيادة عمر الحذمة للسقف .

حراريات الزركونيا (Zirconia Refractories)

عادة تصنف حراريات الزركونيا كحراريات متعادلة ولكنها ليست مقاومة بدرجة جـيدة للخبث الحامضي ولذلك فإنها علي الخط العريض مابين الحراريات المتعادلةو القاعديـة . المـصدر الرئيسي لخام الزركونيا ZrO_2 هو (Beddeleyite) . يتغير بناؤه الداخلي مع ارتفاع درجات الحرارة فعند ١٠٠٠ °م يكون البناء أحادي الميل (Monoclinic) ، ويكون البناء مثلثي (Trigonal) عند درجة حرارة أعلا من ١٩٠0° م . وجـود الجير (Lime) أو أكسيد المغنسيوم يحوله إلي بناء مكعب ثابت ولكنه يقلل من القـدرة علي المقاومة الحرارية للطوب . الزركونيات الثابت المكعب (Cubic Stable Zirconia) الـذي يتم إعادته بخلط الزركونيا مع ٣% من Mgo أو ٥% Cao والتسخين

إلـــي ١٧٠٠ ْم بعد التكسير والطحن والفرز يتم خلطه مع مادة الربط مثل H_3PO_4 ، CaO ، زيــركونات ثانـــي أكسيد المنجنيز في خلاطات طرقيه (Edge Runners) . يتم عندئذ تشكيل الخليط بالطريقة اليدوية ، ثم الضغط علي البارد عند ٥٦٠ كجرام/سم٢ أو بالقولبة المنزلقه(Slip Casting) . درجة حرارة الحرق للطوب يتراوح مابين ١٥٥٠ إلي ١٧٠٠ ْم طبقا للمطلوب للمنتج .

المـــادة الخـــام ل ZrO_2 الذي يوجد في شكل خامات (Zir Conite) ، Zirconia ، و Zircon تحدث تغيرات حجمية للخام مع التسخين ، والتبريد ويتم التثبيت بإضافة CaO/ Mgo ثم الحرق عند ١٧٠٠ ْم .مادة الربط تكون الزركونيا العزوبة(Colloidal Zirconia) (يتم تحضيرها بتخفيف محلول نترات الزركونيوم ثم أخذ المتبقي في المحلول ثابتا ثم التجفـيف). ، يمكــن كذلك إضافة الألومنيا كمادة ربط رخيصة التكاليف . ثم عندئذ تشكيل الخليط في شكل قوالب ، التجفيف البطئ ثم الحرق عند ١٧٥٠ ْم أو حتي عند درجة حرارة أعلا لطوب أفضل .

الخواص :

يمكــن اســتخدام طــوب الزركونيا حتي درجة حرارة ٢٠٠٠ ْم ، بالأضافة أن الطــوب المعــد خصيصا يمكن أن يعمل عند درجة حرارة حتي ٢٦٠٠ ْم . المقاومة الحــرارية تحــت التحمــيل هــي عــند درجة حرارة ١٦٠٠ ْم وعند التحميل ٣،٥ كجرام/سم². هذه تقاوم الخبث القلوي ولكنها لا تكفي للإستخدام مع الخبث الحامضي وهو مقاوم للصدمات الحرارية .

الــزركونيا النقــية (نقطة الإنصهار عند ٢٦٧٧ ْم) تتفاعل مع H_2 ، N_2 عند درجــة حرارة أعلا من ٢٢٠٠ ْم ولكن عند درجة حرارة أقل يكون ثابت في كلا من المجــال المؤكــسد والمختــزل . بسبب انخفاض درجة التوصيل الحراري حتي عند درجات الحرارة العالية ، فإنه مفيد كمادة عزل . ولكن بسبب توصيلة الكهربي العالي عند درجة الحرارة العالية ، فإنه يستخدم كموصل في أفران الحث ذات التردد العالي .

لــه درجـــة مقاومة للتقشف منخفضة بسبب حساسية الزركونيا لتغيرات في بنائه عند التـــسخين بمـــا يحد من استخدامه في الأماكن حيث توجد تغيرات كثيرة في درجات الحـــرارة . مـــواد الـــسيراميك المـــصنوعة من الزركونيا – الهافنيا (نسبة جزيئات الـــزركونيا ٦٠%، $HF\,O_2$ ٤٠%) المحلول الصلب له ضغط بخار منخفض وقوة ممتازة ومقاومة جيدة للتقشف .

الإستخدام:

طـــوب الزركونيا مكلف جدا ويستخدم فقط عندما تكون درجة الحرارة عالية جدا وفي الأفران الكهربية ذات التردد العالي .

الـــزركونيا لا تتفاعل مع أي معدن (عدا التيتانيوم) ولذا فإنه يستخدم في الأوعية المـــستخدمة في حراريات المعادن والسبائك عند درجات الحرارة العالية. يتم تصنيع الأدوات الصغيرة مثل طرف الموقد (Burner Tip) ، غلاف المزدوجة الحرارية (Sheath of Thermocouple) ، بـــوتقات الحرق (Crucibles) ، وقوارب الحرق بالصب المنـــزلق للـــزركونيا (Slipcasting). المـــادة الحـــرارية المستخدمة للثبق (Nozzles) المـــستخدمة فـــي الصب المستمر في مصانع الصلب تكون مصنوعة من الزركونيا . تـــستخدم الـــزركونيا كـــذلك في تبطين أفران السيراميك ذات درجة الحرارة العالية ، وكذلك طبقة التغطية الحرارية للمحركات النفاثة (Jet Engines) وفي صناعة البوتقات (Crucibles) ، الأفران المستخدمة في صهر المعادن الثمينة ، مواد الإناميل ، الزجاج، الزجاج الخاص .. إلخ . تستخدم سير اميك الزركونيا – هافـــينا كبنـــاء من الطـــوب (Tiles) لحمـــل السبائك ذات درجة حرارة الإنصهار العالية حيث التسخين حتي درجة ٢٠٠٠ – ٢٣٠٠ ْم .

حراريات الزركون (Zircon Refractory)

ســـيليكات الزركونيوم (مركب حراري من الزركونيا) توجد في الطبيعة كخام الزركون .وهي تنتج كذلك بتسخين الزركونيا ذات البناء رباعي الزوايا (Teragonal)

مــع الــسيليكا عند ١٤٠٠ °م. الزركون ثابت حتي درجة حرارة ١٧٥٠ °م ولكن عند درجة حرارة أعلا فإنه يتحلل منتجا الزركونيا وزجاج السيليكا أو (Cristobalite) والذي هو الشكل الثابت للسيليكاعند ١٤٤٠ °م . يتم خلط الزركون ومسحوق السليكا مع مادة الــربط مــثل ســيليكات الــصوديوم ، حامض الفوسفوريك .. إلخ ،إلي حالة العجينة المتماســكة حــيث يــتم تشكيله بالضغط إلي الشكل المطلوب . يستخدم كذلك الصب المنــزلق لتــشكيل حــراريات الزركون والتي يتم تجفيفها ثم حرقها عند ١٦٠٠ °م . المقاومــة الحرارية للزركون هي ٢٠٠٠ °م والمقاومة الحرارية تحت التحميل عند ٢ كــج/ســم٢ هي ١٦٠٠ °م . له مقاومة عالية للتقشف ومعامل تمدد منخفض . تستخدم حــراريات الــزركون في أفران إعادة الصهر للألومنيوم ذلك لأنها لا تبتل بمصهور الألومنــيا . وهي تستخدم كذلك في الغلايات حيث توفر ممقاومة عالية لعدوانية رماد الفحم والزيت . النافورات (Nozzles) من الزركون تستخدم في السبك المستمر للصلب – كتل الزركون – الطفل لها معدل ممتاز من التلبيد والتكتل كما أن لها جهد انضغاط عالي . يجب تجنب استخدام حراريات الزركون ملتصقة مع أملاح الفوسفات ، أكسيد الحديد و الفلورسبار حيث أنها تتفاعل مع هذه المواد .

حراريات الماجنزيت (Magnesite Refractorise)

حراريات الماجنزيت هي من أهم الحراريات القاعدية ذات الإستخدام علي نطاق واســع . الماجنزيت هو كربونات المغنسيوم ($Mg\ CO_3$) ويوجد كرواسب طبيعية ، ولكن قبل استخدامه كمادة حرارية ، فإنه يجب تسخينه بشدة والمنتج هو Mgo هو الذي يستخدم كمادة حرارية . الماجنزيت الكثيف وذو مسامية منخفضة المحتوي علي حوالي ٦% Fe_2O_3 (للحــصول علــي ثــبات الماجنيزيا عند درجات الحرارة المنخفضة) مناسب لصناعة الحراريات . يتم الحرق الجيد لخام الماجنيزيت في أفران دوارة إو في الأفــران المهــواه عــند درجة حرارة ١٥٠٠ – ١٧٠٠ °م (للحصول علي بللورات الماجنيــزيا ، والتــي تــسمي – Periclase) ويتم طحن الكتل ذات الحجم ١١٠–١٣٠

مللميتر إلي أحجام أقل من ٥ ملليمتر حيث تكون مناسبة لعمل الحراريات ذات النوعية الجـيدة . يـتم تخليص الماجنزيت المطحون من الأتربة ، الكوارتز ، ومعدن الحديد (بالفصل المغناطيسي) وكذلك الملوثات الأخري .

البديل للماجنزيت هو سحب المياه من $Mg(OH)_2$ الناتج من مياه البحر بمعالجته بالدولومـــــيت المطفـــــي (Slaked Dolomite) ، لإنـــــتاج المجنيــــزيا $[H_2O + MgO = Mg(oH)_2]$

مواد الربط المستخدمة في صناعة طوب الماجنيزيت تشمل الصودا الكاوية ، لبن الجيـر ، سـيليكات الصوديوم ، المولاس ، القار ، الصمغ ، الأسمنت البورتلاندي ، الطفل ، الفيلدسبار ، السيليكا الجيلاتينية ، خام كروم الحديد ، رماد الفحم ...إلخ وذلك طبقا للمادة الخام والخواص المطلوبه للمنتج النهائي . أفضل مادة ربط هي الماجنيزيا الكاوية Caustic- Magnesia والتي تحقق أدني انكماش للطوب مع الحرق . الماجنيزيت الخـام المحتوي علي كمية كبيرة من السيليكا يستخدم لبن الجير كمادة ربط . مكونات الماجنيزيت المحروق جيدا هي كالآتي :

$,\%6-5 = SiO_2, \%90-87 = MgO$
$\%2-1 = CaO, \%2-1 = AL_2O_3 + Fe_2O$

الفقد عند الحرق لا يزيد عن ١% .

يـستخدم ماء بنسبة حوالي ٤-٧% للخلط مع الماجنيزيت المحروق لإنتاج خليط للتشكيل له تحليل منخل (Seive Analysis) كالآتي :

١٢٥،.ملليمتر=٤٠% ، ١٢٥،.ملليمتر=١٠%، ٥،.– ٥،١ملليمير= ٥٠%.

تجفـيف الطـوب الذي تم تشكيله (عادة يتم التشكيل بالضغط الهيدروليكي بإستخدام ضغط ...كجرام/سم٢) يتم عند ٢٠ –٣٠° م لمدة ثلاثة أسابيع أو أكثر. الطوب الذي تم تخفيفه يجب تداوله بحرص نظرا لأنه هش وقوته ضعيفة .

يتم تسخين الماجنيزيت ($MgCO_3$) عند خروج كل CO_2 عند حوالي 800° م منتجا الماجنيزيا الكاوية . تستخدم المجنيزيا الكاوية كمادة حرارية رخيصة يتم عندئذ

تسخينها إلي ١٧٠٠ °م حتي تمام التحلل (Decomposition) .عندئذ لا يحدث أي إنكماش عند الإستخدام الحقيقي . وهو لا يمتص الماء أو ثاني أكسيد الكربون من الجو. لذلك فإنه من الماجنيزيت يمكن الحصول علي حوالي ٤٨% من الماجنيزيت المحروق (Dead Bumt) . الشكل المعدني أو البللوري لأكسيد المغنسيوم (درجة حرارة الإنصهار ٢٨٠٠ °م)يسمي (Periclase). يستخدم طحن هذا البيركليز إلي الحجم المناسب والخلط مع الماجنيزيا الكاوية أو سائل الصرف للسلفيد (Sulphidelye)(الناتج من مخلفات مصانع الورق) أو أكسيد الحديد كمادة ربط والطحن مع الماء ثم التشكيل في قوالب . يتم التسخين البطئ للطوب إلي ١٥٠٠ °م ، والإستمرار عند درجة الحرارة هذه لمدة ٨ ساعات ثم التبريد البطئ . كذلك يصنع الطوب بالرباط الكيماوي والذي لا يحتاج إلي الحرق .

الخواص :

يمكن استخدام طوب المجنيزيت حتي ٢٠٠٠ °م بدون تحميل وحتي ١٥٠٠ °م تحت تحميل ٣،٥كجرام/سم ^{2}. وهو قلوي بطبيعته ولكنه ليس قلوي مثل الدولوميت والتفاعل مع الطوب الحامضي الآخر ليس سريعا جدا ، لذلك فإنه يمكن استخدامه بالإتصال مع الطوب الحامضي ذو درجة الحموضة المنخفضة . طوب الماجنيزيت لا يمكنه مقاومة الصدمات الحرارية ، يفقد القوة عند درجة الحرارة العالية ولا يقاوم الإحتكاك . وللتغلب علي هذه العيوب ، فإن الطوب يمكن تعبيئته وتغليفه في صناديق معدنية واستخدامه .

يتم حرق طوب المجنيزيت في فرن من نوع غرفة الدفق السفلي (Down Draftchambre Typekiln) يشبه ذلك المستخدم في حرق طوب السيليكا أو فرن نفقي (Tummer) والذي يمكن من التحكيم الأمثل عند درجة حرارة ١٦٠٠ – ١٨٠٠ °م . درجة حرارة الحرق الأعلا تقلل من الإنكماش التالي للطوب . الأفران النفقية تتطلب دورة حرق قصيرة مقارنة بأفران الغرفة والتي تتطلب حوالي ١٢ يوم

لدورة الحريق ، أي الحرق والسقي لمدة ٨ ساعات ثم تبريد الطوب . تبريد الطوب يتم ببطئ شديد جدا . يتم عندئذ تخزين الطوب الصالح ، والتالف يتم إعادة استخدامه بعد التكسير والطحن . يجب أن يكون محتوي طوب الماجنيزيت في حدود الآتي :

MgO لايقل عن 85%، SiO_2 أقل من 5.5%، CaO اقل من 2.5%،

Al_2O_3 حوال 1%، $Fe_2O_3 = 6\%$

اللون:

يختلف لون طوب الماجنيزيت مابين الرمادي إلي البني الغامق طبقا للمحتوي من الحديد . الطوب الخالي من الحديد والملوثات الأخري يكون لونه أبيض .

الوزن النوعي والمسامية :

الوزن النوعي عالي (٣،٤ – ٣،٦) وذلك بسبب عملية الضغط العالي للتشكيل . وجــود أكــسيد الحديد يزيد من الوزن النزعي بينما السيليكا تخفضه . درجة الحرق ووجود الملوثات يؤثر كذلك علي الوزن النوعي . أقصي مسامية ظاهرية للطوب هي ٢٤% .

إجهاد الكسرعلي البارد :

إجهاد الكسر علي البارد للطوب الذي تم ضغطه وتشكيله هيدروليكيا لا يقل عن ٣٥٠كجرام/سم٢ ، بينما الطوب الذي تم تشكيله يدويا له قيم إجهاد كسر أقل .

المقاومة الحرارية تحت التحميل :

المقاومــة الحرارية تحت التحميل لطوب الماجنيزيت من النوع الجيد هي حوالي ٢٠٠٠ ْم.الملــوثات مــثل Al_2O_3, CaO, SiO_2 القلــويات ..إلــخ . تقلل من المقاومة الحــرارية . المقاومة الحرارية تحت التحميل ٢ كجرام/سم٢ هي حوالي ٢٠٠ ْم أعلا مــن ذلــك لطــوب الطفــل الحراري حيث تتراوح مابين 1525 ْم– 1575 ْم .طوب الماجنيزيت عادة لا يحدث له ترخيم (Sag) قريبا من نقطة الإنصهار ويظل ثابتا حتي حدوث الإنهيار مثل طوب السيليكا .

التوصيل الحراري والتوصيل الكهربي :

نظـــرا لأن التوصـــيل الحـــراري لطوب المجنيزيت ينخفض مع إرتفاع درجة الحرارة فإنه مفيد عند رفع واستمرار درجة الحرارة العالية . التوصيل الكهربي لهذا الطوب يكون عاليا عند درجة حرارة مرتفعة حوالي 1500°م .

مقاومة التقشف الحراري : (Thermal Spalling Resistance)

طوب الماجنيزيت له مقاومة إحتكاك وتقشف حراري منخفضة لذلك فإنه لا يقاوم التغيـرات الفجائية في درجة الحرارة وتيفتت. حدود طوب الماجنيزيت يمكن خفضها بواسطة:

- الطحـــن الدقـــيق للمادة قبل الخلط بإستخدام الضغط العالي الكافي عند ضغط وتشكيل الطوب
- خفض المحتوي من أكسيد الحديد في الطوب حيث أن ذلك يوفر مقاومة أفضل للصدمات الحرارية مقارنة بالمحتوي العالي من الحديد .
- حـــرق الماجنيزيت عند درجة الحرارة العالية لفترة أطول لتأكيد تمام التحول إلي البيركليز (Periclase) .

مقاومة عدوانية الخبث :

نظـــرا لطبـــيعة القلـــوية فإن طوب الماجنيزيت يقاوم الخبث القلوي الغني بالجير وأكسيد الحديد . هذا الطوب لا يستخدم ملتصقا مع الخبث الحامضي . الطوب ذو المـــسامية العالية والأسطح الخشبية يكون معرضا بدرجة أكبر لعدوانية الخبث . ولكن الطوب ذو الكثافة العالية له مقاومة جيدة للخبث .

الإستخدامات:

تستخدم حراريات الماجنيزيت علي نطاق واسع في صناعة الحديد والصلب فـــي شـــكل طوب مثل حبيبات الماجنيزيت (بقطر حوال ١سم). يستخدم حبيبات الماجنيـــزيت هـــذه لعمـــل قاع الأفران القاعدية . تستخدم الطوب لعمل الأفران

القاعدية ، خليط المعدن الساخن ، أحواض السقي (Soaking) ..إلخ .

يستخدم طوب الماجنيزيت في تلك الأجزاء من الفرن التي تتطلب مقاومة عدوانية الخبث القلوي والتي لا تكون معرضة للتغيرات في درجة الحرارة . كذلك يستخدم هذا الطوب في الأفران المستخدمة في رفع واستمرار الحرارة المرتفعة . ولكن العامل الذي يحد من استخدام طوب الماجنيزيت هي المقاومة المنخفضة للتقشف (Spalling) ، انخفاض المقاومة الحرارية تحت التحميل ، التوصيل الحراري العالي عند درجات الحرارة العالية ، التكلفة العالية .

معظم استخدامات طوب الماجنيزيت هي أفران الجمرة المكشوفة(Open Hearth)، خلاطات المعدن الساخن (كتل الحديد الخام) والقوس الكهربي ، أفران صب الصلب الأخرى. تستخدم هذه الأنواع من الطوب كذلك فى السفن وأفران التنقية للذهب والفضة والبلاتين . محولات النحاس(Copper Converters)وأفران تنقية باللهب ، أفران صهر وتنقـية النــيكل والرصاص والأنتيموني وكذلك أفران الصهر للمعادن والسبائك الغير حديدية مثل (Cupro-Nickel) هذه تستخدم طوب المجنيزيت . رغم تكلفتها العالية ، فإن هــذا الطوب مفضل في تبطين المناطق شديدة السخونة لأفران الجير والأسمنت بسبب المقاومة الزائدة للتفاعل الكيماوي مع الكلنكر وأكسيد الكالسيوم الساخن .

بوتقات فرن الحث الكهربي (المستخدمة في صهر السبائك الحديدية والغير حديدية) باستخدام مادة الربط من الطفل المنصهر للمجنيزيا (Clay Bonded Fused Magnesia).

حراريات الماجنيزيت ذات الغلاف المعدني (Metalcased) تستخدم في كل من أفران الجمرة المكشوفة والأفران الكهربية لعمل الصلب . الغلاف من الصلب مع التسخين فإنه يلين ويلتحم معا منتجا تبطين أحادي بأدني نفاذية بما يحقق حسن الأداء .السقي أو الربط للمجنزيت بالقار يستخدم في محولات الأكسجين حيث درجة الحرارة أعلا من 1610°م أو حيث يكون السبك مستمر للصلب ، يستخدم البيركليز (Mgo) المنصهر كمادة عزل كهربي . تستخدم عجينة الماجنزيت لإنتاج الفتحات الضيقة

لصب (Teeming Nozzles) الصلب والتي تصنع بالضغط بدون حرق – تستخدم للصب السريع للصلب من مغارف نقل الصلب (Ladles) ذات السعة الكبيرة .

تـصنيع الألـواح والكمرات للبوابات المنزلقة (المستخدمة في صب الصلب) باستخدام البيركليز (Mgo) المتشرب بالبكاليت والذي له مقاومة عالية للحرارة والبري وقوة عالية . كذلك يستخدم مصهور (Mgo) كالواح في البوابات المنزلقة .

تبطـين محولات النحاس وقيعان أحواض السقي يتم بإستخدام طوب الماجنيزيت بينما الإصلاح والإنشاء لقاع فرن الجمرة المكشوفة يتم بلإستخدام حبيبات صغيرة (Peasize) من الماجنيزيت المحروق جيدا .

الـسدادات المثقبة والكتل المستخدمة في نفح الصلب المصهور بالغازات الخاملة تـصنع مـن مادة مركبة من بيركليز والكورندم. ممرات الغاز إلي الفرن تستخدم في معالجة الصلب الكربوني بسحب الغازات لأزالة الكربنة (Decarbonising) .

طـوب الماجنيزيت مع طبقات العمل من البيركليز مع إضافة الألومنيا هو مادة جيدة للسبك بدون سدادة في وحدات السبك المستمر .

حراريات الدولوميت : (Dolomite Refractories)

الدولوميت الذي يمثل بالمعادلة ($CaCO_3.Mg\,CO_3$) عند الحرق (التحميص) ينتج (Cao , Mgo) . صعوبة استخدامه هي أن cao يمتص الماء وثاني أكسيد الكربون عند درجـة الحرارة العادية ويذا يسبب تفتت الطوب . يمكن منع ذلك إما بتغطية الطوب بالقار بحيث أنه عند التخزين يتم تجنب الإلتصاق مع الماء أو مع ثاني أكسيد الكربون، أو التثبيت (Stabilized) بخلط ($MgO.SiO_2$) المسمي (Serpentine) مع الدولوميت والتحميص ، حيث يتم إنتاج داي أو تراي كالسيوم سيليكيت والذي لا يمتص الماء أو ثاني أكسيد الكربون . بعد التحميص يتم الخلط مع الماء ، رابط السيليكا وعمل الطوب . يتم تجفيف الطوب والحرق عند 1500°م لمدة يوم واحد .

نظــريا يحتوي الدولوميت علي حوالي ٣٠،٥% Cao ، ٢١،٨%Mgo ، ٤٧،٧% CO_2 . ولكن الدولوميت ، المرتبط مع الكالسيت يمكن أن يحتوي علي نسبة أعلا من Cao . الدولوميت المثالي المستخدم في الطوب الحراري يجب أن يحتوي علي ٤٥،٦ % جزئ من كربونات المغنسيوم ، ٥٤،٤% جزئ من كربونات الكالسيوم ، كما يجب أن يكون صلبا ومدمجا له مظهر متجانس محتويا علي القليل جدا من الحديد ، السيليكا ، الألومنيا نظرا لأن هذه تقلل من المقاومة الحرارية لطوب الدولوميت .

يــتم الحــرق الــتام للدولوميت في فرن دوار عمودي (Rotary Shaftkiln) عند 1600°م فــي وجــود بعــض من السيربنتين (Serpentine) والذي يعمل علي تثبيت الدولوميت (السيربنتين هو سيليكات المغنسيوم المائية). المحتوي من Cao , Mgo في الدولومــيت المحــروق جــيدا هــو حوالــي ٤٢% ، ٤٨% علي التوالي . حتي أن الدولوميت المحروق جيدا فإنه شره للمياه بطبيعته . ولذلك لمنع تميؤه ، فإنه يتم تغطية حــراريات الدولوميت بالشمع أو بالقار بعد الحرق والتبريد مباشرة . يتم تخزين هذا الطوب في غرفة مكيفة عند درجة حرارة منخفضة ورطوبة مناسبة . الأفران التي يتم تبطينها بطوب الدلوميت المغطي بالشمع أو بالقار وبمجرد تسخين الفرن ، فإنه لا يتم تبريده إلي درجة حرارة الجو ، وإلافإن بطانة الفرن سوف تتفتت بسبب التميؤ .

منع التميؤ والثبات للدولوميت :

يتم الحد من نشاط الدولوميت بتحويله إلي السيليكات أو إلي مركب آخر له درجة حرارة إنصهار عالية وذلك لمنع تميؤه . بسبب انخفاض نقطة الإنصهار (1540°م) للمونوكالسيوم سيليكيت فإن تحويله إلي الداي أو التراي كالسيوم سيليكيت يكون مفضلا نظــرا لأن نقطة انصهار مرتفعة وهي 2130°م ، ١٩٤٠°م بالتتالي. بخلاف الأشكال الــبللورية المتعددة (Polymorphic) لسيكات الكالسيوم α ، B ، Y ، فإن الشكل α يكــون ثابــتا عند أعلا من ١٤١٠°م ، الشكل B مابين ٦٧٥ ، ١٤١٠°م ، الشكل Y عــند أقل من ٦٧٥°م . تكون الشكل Y (جاما) يصاحبه زيادة في الحجم ١٠% حيث يحــدث الإنفجــار ومــن ثــم التفتت للمادة . إضافة (Fe_2O_3) بحد أقصي ٤% إلي

الدولوميت يمنع تكون البللورات γ (جاما) من الداي كالسيوم سيليكيت . إضافة الفوسفات (Pnosphates) أو البورون يعمل كذلك علي تثبيت الدولوميت .

تحميص الدولوميت : (Calcination of Dolomite):

الدولوميت والسيربنتين (Serpentine– $MgO,2SiO_2.2H_2O$) يتم خلطهم بالنسب المناسبة ثم الطحن في مطحنه الكور مع كمية قليلة من الماء.يتم بعد ذلك تحميص الخليط المطحون في فرن دوار (عدد اللفات ٠,٦ إلي ٠,٨ لفة في الدقيقة) عند ١٦٠٠ °م لمدة زمنية كافية لإتمام تفاعل التحول . إجمالي الوقت للتحميص والتبريد يمكن أن يكون حوالي ٢،٥ ساعة . تحميص الدولوميت مع السيربنتين لا يترك Cao حر ولكن ينتج التراي كالسيوم سيليكيت والبيركليز (Mgo) الذي يكون خليط حراري جيد جدا . مع زيادة درجة التحميص فإنه يتم أولا التخلص من الماء ، CO_2 ثم تكون التراي كالسيوم سيليكيت مع بعض البيركليز والزجاج أي SiO_2 (طبقا لكمية السيليكا الزائدة) الكلنكر (Clinker) المتكون ذو الحبيبات الكبيرة مع التحميص يتم تبريده وتكسيره وطحنه . النسبة المطلوبة من كتلة الدولميت المطحونه والمحروقة جيدا ذات حبيبات من ١ –٣ مليمتر ، من ٢،٠ إلي ١ مليمتر، الحبيبات الدقيقة أقل من ٢،٠مليمتر هي عادة ٥٥ –٥٧% ، ٥ –١٥% ، ٢٠ – ٤٠% علي التوالي .

صناعة طوب الدولوميت الحراري :

يتم خلط الدولوميت المحروق جيدا بالتدرج المناسب للحبيبات مع مادة الربط و ٤ % ماء إلي الكتلة الشبه جافة . مواد الربط لحراريات الدولوميت تشمل لبن الجير ، القار ، سيليكات المغنسيوم ، الجير ، البلاستك ، الخبث القاعدي ، كلوريد المغنسيوم .. إلخ . نظرا لأن وجود أو إضافة الطفلة ينتج عنه تكون الأورثو – سيليكيت والذي يصاحبه بزيادة حجميه حوالي ١٠% لذلك فإن وجوده في الخليط يتم تجنبه دائما . يتم عندئذ تشكيل الخليط إلي الشكل المطلوب بإستخدام الضغط الهيدروليكي باستخدام

ضغط حوالي ٧٠٠كجرام/سم ^{2} لأنتاج الطوب القوي . يتم بعد ذلك تجفيف الطوب في تـــيار من الهواء النظيف الجاف عند أقل من ٦٠ °م لخفض التشقق . يتم عندئذ حرق الطـــوب في فرن السحب السفلي (Down Draught) بالتسخين البطئ أولا للوصول إلى ٤٠٠ °م فـــي ٢٠ –٢٥ ســـاعة وانتهاء الحرق عند١٢٠٠ °م. يسبب الإنخفاض النسبي لدرجـــة حرارة الحرق والتي هي ١٢٠٠ °م(مقارنة بدرجة حرارة ١٤٥٠ °م السابقة) فإن الطوب المنتج يكون من نوعية غير جيدة . تميؤ وتلف هذا الطوب أثناء التخزين يـــتم منعه بالتغطية بطبقة من الشمع أو القار بما يمكن من عدم الإلتصاق المباشر مع الهواء الجوي .

طـــوب الدولوميت الحراري بالربط المعدني يتفوق علي ذلك بالربط بالقار بسبب ارتفاع درجة حرارة الحرق .

الخواص:

حـــراريات الدولومـــيت أكثـــر قلـــوية وأقل مقاومة حرارية مقارنة بحراريات المجنيـــزيا. الأفران المستخدمة للطوب الغير مثبت (Unstabilized) لا يتم تبريدها أثناء الإستخدام لأن الجير المطفي سوف يتميأ وأن الطوب سوف يتفتت . طوب الدولوميت يمكـــن أن يـــتحمل أحمال حتي٣،٥كجرام/سم٢ عند 1650°م . وهو ضعيف المقاومة للصدمات الحرارية .

اللون ، الوزن النوعي ، المسامية :

طبقا لنسبة الحديد والملوثات الأخري في طوب الدولوميت ، فإن لونه يتغير من الأبـــيض إلـــي لون الجلد (B u ff) – الوزن النوعي والمسامية الظاهرية لحراريات الدولوميت هي ٣،٢ ، ٢٣% علي التوالي .

إجهاد الكسر علي البارد :

إجهـــاد الكـــسر علي البارد لحراريات الدولوميت المحتوي علي التراي كالسيوم سيليكيت هو أكثر من ٤٠٠كجرام/سم ^{2}.

المقاومة الحرارية تحت التحميل :

طـبقا للمكـونات فإن المقاومة الحرارية للدولوميت تتراوح مابين ١٥٤٠ ْم إلي ٢١٣٠ ْم. حـراريات الدولومـيت التي تحتوي علي (Mono- Calicum,Dicalcium And Tricalcium Silicates) ، في بنائها تتصهر عند ١٥٤٠، ٢١٣٠ ، ١٩٠٠ ْم علي التوالي . المقاومـة الحـرارية تحت التحميل لطوب الدولوميت (المحتوي علي Mgo وعلي التراي كالسيوم سيليكيت) تحت تحميل ٢كجرام/سم^2 هي ١٦٥٠ ْم.

مقاومة التقشف الحراري:

طوب الدولوميت المحتوي علي التراي كالسيوم سيليكيت له مقاومة قليلة لمقاومة التقـشف مقارنـة بطـوب الماجنيزيت . ولكن طوب الدولميت المحتوي علي الداي كالـسيوم سيليكيت له مقاومة أفضل ضد التقشف ذلك لأن الداي كالسيوم سيليكيت له حـساسية أقـل للتغير في درجات الحرارة مقارنة بسيليكات المغنسيوم .يتغير الداي كالـسيوم سيليكيت إلي الشكل جاما Y عند التبريد إلي أقل من ٦٧٥ ْم ويصاحب ذلك زيادة في الحجم بنسبة ١٠% وبذا ينتج عن ذلك فرقعات بسيطة وتفتت للمادة . يمكن تكون داي كالسيوم سيليكيت في الشكل جاما من طوب الدولوميت بإضافة Fe_2O_3 حتي ٤% والذي لا يقلل بدرجة كبيرة المقاومة الحرارية لطوب الدولوميت .

مقاومة عدوانية الخبث :

رغم المقاومة الجيدة للصلب المنصهر ، فإن طوب الدولوميت له مقاومة منخفضة لعدوانـية أكسيد الحديد وأكسيد الكالسيوم (Lime). أكسيد الكالسيوم الموجود في طوب الدولومـيت الغيـر مـستقر نشيط جدا ، لذلك فإن استخدام االطوب الغير مثبت من الدولومـيت أو طوب الدولوميت المحتوي علي أكسيد الكالسيوم الحر يجب تجنبه وإلا فإنـه عـند تبـريد الفرن للإصلاح فإن أكسيد الكالسيوم الحر الموجود سوف يمتص الـرطوبة (نظرا لأنه شره للمياه) بما ينتج عنه تفتت للبطانة من طوب الدولوميت . يـتم التثبيت لطوب الدولوميت وذلك بالمعالجة الحرارية (التطبيع – Tempering) في

فرن التطبيع.

الإستخدامات :

طوب الدولوميت المثبت أصبح البديل لطوب الماجنيزيت لرخص تكلفته . تستخدم حراريات الدولوميت في الأفران القلوية .

بخلــط الــدك للأفران الكهربية وأفران الجمرة المكشوفة القاعدية يتم تحضيرها تجلــط الدولومــيت المحــروق مع القار . حراريات الدولوميت (ذات حجم ١ -١٠ لفتحات المنخل) تستخدم كمادة تهذيبية لإصلاح لهذه الأفران بعد سحب المعدن وكذلك بينما تكون ساخنة . الدولوميت المحروق جيدا (منفردا أو مخلوط مع حبيبات الكوك) يستخدم في قفل فتحة سحب المصهور لأفران الجمرة المكشوفة القاعدية .

مغارف إزالة الكبريت من المعدن الساخن (خارج الفرن اللافح بإضافة الجير المطفي) يــتم بتطبيــنها بطوب الدولوميت . نظرا لمقاومته الجيدة للصدمات الحرارية وكذلك لمقاومــة عدوانــية الخبث أفضل من وصلات الطفل الحراري ، فإن الوصلات الغير محــروقة من الدولوميت المثبت تستخدم في عمل الأجزاء العلوية من قضبان السدادة وخاصة عندما يكون زمن المكوث طويل .

مواد مقاومة حرارية عالية أخري

أعــلا درجــة إنصهار لأكسيد هو الثوريا (Thoria) حيث درجة حرارة انصهار ٣٠٧٠ °م (الــثوريا هــي أكسيد الثوريوم) ولكن إستخدامه محدود جدا بسبب سعره المرتفع وكذلك لصعوبة تشكيله .

الأكاســيد المــستخدمة كثيــرا هــي الماجنيــزيت (Mgo) ٢٨٠٠ °م ، الــزركونيا 2680 °م، البــريلليا (Beryllia) ٢٥٧٠ °م والألومنيا ٢٠٤٠ °م . يتم الطحن الدقــيق للأكــسيد النقــي مــع الماء ومادة ربط عضوية مؤقتة مثل النشا ، الشمع ، الكحــولات ذات درجة حرارة الغليان المرتفعة ... إلخ مع الحرق للشكل النهائي فإن الرابط المؤقت يتم إتلافه والجسيمات الصغيرة يتم تلبيدها مع بعض البعض . تحدث

تفاعلات سطحية صلبة وبالتدريج تنتج بللورات دقيقة التي تحتوي الشكل .

كــل من هذه الأكاسيد له خاصية هامة . فمثلا الألومنيا هي أكثرهم صلابة وهي مفــيدة في حالة الرغبة في مقاومة البلي (Wear) البريلليا له مقاومة عالية للصدمات الحــرارية ولا يختزل بالكربون أو بأول أكسيد الكربون حتي ٢٠٠٠ ْم . رغم درجة حرارة الإنصهار العالية للماجنيزيت فإنه لا يمكن استخدامه عند درجة حرارة أعلا من ١٧٠٠ ْم في جو الإختزال و ٢٢٠٠ ْم في جو الأكسدة نظرا لأن الزركونيا تحدث له تغيــرات بللورية فإن مقاومته للصدمة الحرارية منخفضة عند درجة حرارة أعلا من ١٢٥٠ ْم . ولكن يمكن تثبيته بإضافة أكسيد الكالسيوم أو أكسيد المغنسيوم .

تستخدم الأكاسيد النقية في عمل ما يسمي بالحراريات الفائقة (Super Refractores) والتــي هي مناسبة للإستخدام عند الإلتصاق مع المعدن المنصهر في جو مؤكسد ذلك بــسبب ارتفاع درجة حرارة إنصهارها .لإنتاج هذه الحراريات للفائقة من الأكاسيد ، فإنه يتم تلبيد المادة الكيماوية النقية أو صهرها في أفران كهربية يلي ذلك الطحن إلي مسحوق دقيق . يتم إكساب اللدونة للمخلوط باستخدام بعض مواد التلدين (Platicisers) . يتم التشكيل للخليط بالبثق المنزلق (Slip Casting Extrusion) ، الضغط علي الساخن أو بالضغط الهيدروليكي . عند حرق حراريات الأكسيد هذه (عند درجة حــرارة عالــية والتحكم في حالات الجو والحرارة) . فإن المادة العضوية الموجودة ستحترق وإعادة التبلر مع التسخين يكسب الطوب كثافة عالية .

الأكاســيد الحــرارية هذه سواء كانت في أشكال أو في شكل الطوب تكون عالية الكــثافة ، وذات مقاومة عالية لعدوانية الخبث الكيماوية ولها إجهاد كسر علي البارد مــرتفع ، والثــبات عــند درجات الحرارة العالية وهي نسبيا خاملة بالنسبة لغازات الهيدروجين والنيتروجين والأمونيا والمجال الكربوني أو الكبريتي .

عــند درجة الحرارة العالية ، فإن لها مقاومة كهربية عالية وكذلك مقاومة للبري والإحــتكاك والتآكل . ولكن استخدامها محدود لأغراض خاصة بسبب عدم توافرها ، الــتكلفة العالية للإنتاج وطرق التصنيع الخاصة للتشكيل . من بين الأكاسيد الحرارية

الهامة أكاسيد الزركونيا ، الثوريا ، البريلليا وأكاسيد المغنسيوم والألومنيوم ، السيريوم

حراريات الكربيد : (Carbide Refractories)

عمــوما كــربيد الــسيليكون أو (Carborundum) يستخدم في صناعة حراريات الكربيد .

كــربيدات مختلف العناصر مثل كربيد الزركونيوم ، كربيد التيتانيوم التنتالم ، كربيد البورون ... إلخ هذه تستخدم كحراريات لأغراض خاصة . وهي عالية التكلفة

كربيد السيليكون (Sic):

كــربيد السيليكون أو الكاربورندم هو من أهم الحراريات. وهو ينتج في الأفران الكهربية بتسخين الخليط الآتي عند درجة حرارة حتي ١٣٠٠ – ٢٢٠٠ مْ

رمل (SiO_2)	٢٥ – ٥٤ %
كوك (C)	٣٥ %
نشارة خشب	٧ – ١١
ملح	١،٥ – ٤ %

يحدث التفاعل الآتي:

مكونات الكاربورندم المنتج هي كالآتي :

سيلكون	٦٥%
كربون	٣٠%
ملوثات	حوال ٥%

خامات حراريات كربيد السيليكون هي

١- الكاربــورندم (sic) : يــتم طحنة الي حجم الحبيبات بنسب مناسبة لمختلف المطلــوب حجم الحبيبات من رقم منتحل ١٦ الي رقم منتحل ١٠٠ ثم الخلط معا طبقا لنوع الحراريات المطلوبه

٢- مادة الربط مثل الجير الحي ، أو الجبس ، كبريتات الالومنيوم ، الدولوميت ،

الكاولين أو الفلسبار ، الغراء و الزيت المعدني ، القار ، المولاس ، الراتنج أو الجلسرين .

التصنيع :

يتم خلط الكاربورندم المطحون و مادة الربط مع قليل من الماء في خلاط (Pan Mil) . حتي تشكيل الخليط في شكل قوالب بالطريقة اليدوية أو بالضغط .

يــتم حــرق الطــوب الــذي يتم تشكيلة في فرن كهربي حتي ١٤٠٠-٢٠٠٠ْم طبقا للخاصية المطلوبة .

حــراريات كــربيد السيليكون . معروف أنها من الحراريات ذات النوعية المتفوقة و تحــتوي علــي SIC مــا لايقــل عن ٨٥% حبيبات SIC لها طبقة سيليكا رقيقة علي أسطحها. يتم توفير الربط المناسب بتفاعل ماده الربط و الطبقة السطحية حيث تتكون طــبقة تلامس سطحي ملتصق . طبقا لنوع مادة الربط في كاربيد السليكون الحراري فإنه ينقسم الي خمس مجموعات .

- الكربيد شبة السيليكون (Semi Silicon Carbide)
- اكاسيد الربط بالطفلة (Oxide of clay Bonded)
- الربط بالنيترايد (Nitride Bonded)
- الربط بالأوكسي نايرترايد (Oxy Nitride Bonded)
- إعادة التبلر (Recrystallised)

حراريات الكربيدشبه السيليكون هي أساسا حراريات الطفلة الحرارية المضاف إليها كمــية من حبيبات كربيد السليكون (SIC). أكاسيد الربط بالطفلة هي أكثر حراريات الكــربيد المستخدمة حاليا حيث يكون فيها (SIC) بنسبة أكبر من ٨٥% (عدا في حالة إضافة الألومنيا أو الزركونيا) . تتم عملية الرباط بسبب تكون السليكون و السليكات بإضـــافة الطفلـــة و الأكاسيد (مثال تلك للكالسيلوم ، الحديد ، الباريوم) . حراريات كــربيد الــسليكون المــرتبطة بواسطة نتريد السيليكون (Si_3N_4) هي أكبر مقاومة للأكــسدة ولكــنها أكثــر تعــرض للتلف أثناء الدورات الحرارية . حراريت الربط

بالأوكسي نايتريد (و التي لها رباط بالسيليكون أوكسي نايتريد) لها خواص أكثر تطورا مقارنة بتلك ذات المكونات من رباط الأكسيد وهي كذلك عالية المقاومة لنمو الأكسدة . وهي قوية عالية المقاومة للأكسدة، ولها ثبات في كثير من المجالات الكيماوية وترتبط بقوة مع حبيبات (Sic) . وهي توفر درجة أعلا من الحماية لحبيبات (Sic) أكثر من تلك الناتجة عن أي رباط آخر .

الخواص :

الإستفادة من حراريات الكاربوندم تقع علي صلابتها (Hardness) ، إنخفاض معامل التمدد ، القوة العالية والمتانة . عموما هذه تستخدم لعمل الصقار (Saggar) (الصقار هو غلاف صندوقي من صلصال الحراريات تنضد فيه الخزفيات للشي)، وللأفران حيث لا تتعرض بتأثير عوامل الإختزال .

تستخدم كربيدات السيليكون لأفران صهر المعادن مثل فرن الدست (Cupola) ، أفران إعادة صهر الألومنيوم ، بتبطين فرن البوتقة ، بوتقات إعادة صهر المعادن الغير حديدية وأفران التنقية بما فيه إختزال الألومنيوم ، وصهر الزنك وكذلك للأفران اللافحة (Muffles) ، غرف الحرق ، ومسترجع غازات حرق الفرن للخزفيات (Ceramic Recupertors) . بسبب صلابته العالية فإن المزلقات (المزحلقان Skids) المستخدمة في أفران اعادة التسخين تصنع فيها . وهذه تستخدم كذلك في صناعة بزبوز (Nozzles) المحركات الصاروخية ، القطع الأمامية للصواريخ ، قضبان الحلزون المقاوم للكهرباء ، المستخدم في إنشاء الأفران ذات درجات الحرارة العالية ...إلخ ، الأفران الدوارة المنتجة لما هو واقع وارء البحر(Ultramarine)تستخدم حراريات كربيد السيليكون . استخدام Sic في وجود الأكسجين أو أكسيد الحديد وخاصة عند درجات الحرارة العالية يجب تجنبه نظرا لأن تلك عدوانية بالنسبة له .

السيليمانيت والمواد المرتبطة به : (Sillimanite , Allied Materials)

الأتي هي المواد الطبيعية التي تستخدم كحراريات :

سيليمانيت $(Al_2O_3.SiO_2)$ Sillimanite

موليت $(3Al_2O_3.2SiO_2)$ Mullite

كيانيت $(Al_2O_3.SiO_2)$ Kyanite

السيليمانيت :

يوجد السيليمانيت كاير طويلة بللورية . البللورات هي بنظام المعين المستقيم (Orthorhomdic)

صناعة المواد الحرارية من السيليمانيت الموجود في الطبيعة :

يوجد السيليمانيت في شكل كتل وكمرات . وهذه يتم تقطيعها إلي كتل صغيرة ، ثم يتم الطحن والخلط مع الطفل الحراري ثم التشكيل في الشكل الحراري .

الخواص :

- لــه درجــة ليونة عالية أعلا من 1800°م وهو ثابت جدا حتي درجة حرارة الليونة .
- ثابت في المجال المؤكسد والمختزل .
- معامــل الــتمدد منخفض حتي ٤٥،. × ١٠ $^{-5}$ وهذا يمكنه من تحمل التغيرات المفاجئة في درجة الحرارة .
- لايحدث له أي تغير حجمي مع التسخين .
- له تفاعل متعادل جيد .
- مقاوم جيدا لعدوانية التآكل لأي خبث ومقاوم للإحتكاك .
- له قوة عالية حتي درجة حرارة الليونة .
- له قدرة توصيل حراري عالية وهي (10 Btu/ hr/ sqft/of/inch)
- وزنه النوعي ٣،٢٣ .

السيليمانيت النقي لا لون له ولكن عموما يكون لونه بني بسبب وجود الحديد .

الإستخدامات :

يستخدم في عمل الطوب ، الكتل ، البوتقات ، المزلجات ، ووصلات الحراريات للسلع الكهربائية وأنابيب أفران الحريق .

الكيانيت : Kyanite

الكيانيت له كل صفات ومميزات السيليمانيت ولكنه أقل ليونه من السيليمانيت وصلابته في ٥ إلي ٧ بينما السيليمانيت له صلابه من ٦ إلي ٧ موهز (Mohs)

درجة حرارة التحلل للكيانيت هي ١٣٥٠ – ١٣٨٠ °م

العيب الآخر في الكيانيت هو أن له نسبة تمدد حجمي أكبر من السيليمانيت . التغير في الحجم للكيانيت هو ١٦% وللسيليمانيت هو٦% .

المولييت : (Mullite)

الموليت نادر الوجود في الطبيعة $(3Al_2O_3.2SiO_2)$ وهو يتكون عند تسخين الكيانيت أو السيليمانيت . وهو يتكون كذلك في الطفل المحروق .

الموليت شديد الصلابه ، وزنه النوعي ٣،١٦ . درجة حرارة تحلله هي ١٨١٠ °م وهو شديد المقاومة للقلويات ولكن الزجاج المنصهر يحدث به تآكل وتلف .

لذلك فإن كل هذه الصفات تجعله من الحراريات الجيدة جدا . عند الرغبة في عمل حراريات جيدة من الطفل الحراري ، فإن مكوناته يجب أن يتم إتزانها بإضافة قليل من البوكسيت (Al_2O_3) . وبعض المعجلات (Accelerators) مثل القلوي ، السيليكات ، المجنيزيا .. إلخ ، ذلك لتأكيد التركيب الكيماوي للموليت . ثم الحرق عند ١٣٥٠ – ١٣٨٠ °م وذلك لتلوين الموليت$(3Al_2O_3.2SiO_2)$.

تلف الحراريات :(Failure Of Refractories)

أكبر اسباب تلف الحراريات هو التفاعل الكيماوي في المجال الذي تعمل فيه.

حيث يكون بالتأكيد مجال غير مماثل فمثلا ، الحراريات الحامضة لا يتم استخدامها في أفران مستخدمة لمواد خفض الصهر(Fluxes) القلوية أو الخبث والعكس صحيح . رغم استخدام مواد خفض درجة حرارة الصهر المناسبة فإنه قد توجد ملوثات التي تتفاعل مع طبقة البطانة . في التفاعل الكيماوي تلعب مسامية المادة الحرارية دور هام . كلما زادت المسامية كلما زاد العمق الذي يتسرب اليه الخبث ويتلف الحراريات . المسامية تؤثر كذلك علي التفاعلات مع الغازات . ترسيب الكربون من أول أكسيد الكربون في حراريات الطفلة الحرارية في الفرن اللافح هو من الأسباب الهامة في تلف الحراريات. ترسيب الكربون يسبب حدوث إجهادات داخلية عالية بما ينتج عنه تفتيت للطوب . كلما زادت درجة الحرارة حيث زاد حدوث التفاعل الكيماوي . أحيانا إرتفاع درجة الحرارة بعد الحد الأمن يحدث تلف سريع في الحراريات . أخيرا فإن تقليب أو حركة المادة يعتبر هام جدا .إذا كان هناك تقليب علي السطح فإن السطح الجديد يتعرض بسرعة للتفاعل الكيماوي ويحدث به التلف .

عدوانية الخبث أو المعدن علي الحراريات لا يمكن تجنبه . يمكن خفضه بإزالة الأكسدة (De.Oxidation) بمعدن الألومنيوم . كمية وأساسا سيولة الخبث هي العوامل ذات التأثير علي التفاعل مع الحراريات . نواتج التفاعل هي كالسيوم – ألومنيو – سيليكات ذو درجة الإنصهار المنخفضة وكذلك الفيريت (Ferrites)

الموليت (Mullite) النقي له مقاومة مرتفعة بالنسبة للخبث . المنجنيز في الصلب المرن هو أكثر المكونات نشاط في المعدن . فهو يختزل SiO_2 في الحراريات SiO_2 في بناء الموليت أو في شكل كريستدباليت (Cristobalite) أقل نشاطا عن وجودة في شكل آخر . بينما السيليكون في الصلب يعيق العدوانية علي الحراريات ، فإنه نفسه يمكن أن يدخل السيليكا الزجاجية في مسبوكات الصلب وذلك في حالة وجوده بكمية كبيرة . لذلك فإن نسبة Mn / Si في الصلب هامة جدا وذلك بالنسبة لتآكل الحراريات . تآكل الحراريات حيث تنتج حبيبات من الحراريات غير مرغوب فيه أكثر من التآكل بالتفاعل المنتج

لمــواد زجاجــية تــتغلغل في الصلب . الصلب ذو الكربون المنخفض ينتج جسيمات حــرارية مــتغلغلة ، وبــذا يعمــل علي خفض عمر الخدمة لبطانة المغرفة الحاملة للمصهور ، بينما يكون العمر مرتفع نسبيا مع الصلب حيث الكربون متوسط .

الــصلب يحتوي ١% كربون ، ٠.٠٣% منجنيز ، ٠.٠٣% سيليكون ١% كروم لايحدث نحــت (Erode) لــبطانة الحراريات ولكن يعطي سطح زجاجي ناعم . عمر الخدمة للحراريات يتوقف كذلك علي فترات التوقف(Dwelling) ودرجة حرارة التشغيل .

تفاعلات إضافية للحراريات من الناحية العملية كالآتي:

- العفــارة (Dusting) بــسبب تحول C_2S يمكن منعها بإضافة B_2O_3, P_2O_5 أو Cr_2O_3
- أكسيد الحديد يجب أن يكون منخفض .
- تآكل الحراريات بالزجاج يرجع إلي تسرب أيونات القلوي إلي المجال الصلب
- إرتفاع ٥٠ ْم في درجة حرارة التشغيل لصهر الزجاج ، سوف تقلل من عمر الحــراريات بنــسبة ٥٠ % . درجــة الحرارة الأعلا أساسية لسرعة العمل وتحسين نوعية الزجاج .
- يلزم تجنب السيليكا الدقيقة والحديد الحر في الجو المختزل .
- وجود V_2O_5 في وجود ٢% Na_2O يقلل من القدرة الحرارية لكل من طوب الــسيلكا والطــوب الحــراري بمقــدار ٢٠ ْم ولكــن فــي وجــود ٥% مــن Na_2O بحوالــي ٨٥ ْم ، ٤٠ ْم لكل من طوب السيلكا والطوب الحراري علي التوالي .
- ٤–٥% من Fe_2O_3 تقلل من قدرة المقاومة الحرارية لطوب السيلكا بحوالي ٣٠ ْم ولكــن لا تؤثر علي الطوب الحراري ، ولكن Cao له تأثير خطير علي الطوب الحراري .

الــسبب الآخر الهام هو التشظي أو التقشف (Spalling) ، وسببه قد يكون حراري أو ميكانيكي أو خاص ببناء الحراريات نفسها ومكوناتها .التشظي أو التقشف الحراري

قد يكون بعدم تساوي التمدد أو الإنكماش عند الأجزاء المختلفة بسبب التغير السريع في درجـة الحـرارة . التشظي الميكانيكي يكون غالبا بسبب الإهمال في تحميل الفرن أو بسبب إزالة المواد منه والذي بسبب إتلاف للحراريات . يحدث التلف بسبب التغير في مكـونات الحـراري الناتج عن التفاعلات مع الخبث .. إلخ ، وتكون النتيجة هو تغير معامـل تمـدده . لـذلك فإن أجزاء مختلفة تتمدد وتتكمش بدرجات مختلفة. التشظي للحراريات يمكن خفضه بالتصميم الجيد ، وبناء وتشغيل الفرن بطريقة جيدة .

يمكـن إضافة الإحتكاك والبري (Albrasion) كسبب آخر هو يعني الإحتكاك المسبب لإزالة المادة . في الفرن ،توجد حركة للمواد وعادة تنزلق علي طول الحراري مـواد صـلبة وقـوية . توجد مواد منصهرة من الخبث والمعادن المتدفقة . الغازات الحاملـة للأتـربة عادة تتحرك بسرعات عالية . كل هذا الإحتكاك للحراريات يسبب إتلافه .

إختيار الحراريات

إختيار الحراري المناسب يتوقف علي عوامل كثيرة التي يمكن تصنيفها طبقا للمجموعات التالية :

- عوامل متعلقة بالمواد الحرارية : حيث يلزم دراسة الحراريات المتاحة .
- عوامل متعلقة بتصميم الفرن : وهو ما نوع الحراري الذي يلزم استخدامه في فرن معين . يتوقف إختيار الحـراري علي نوع الفـرن ، ظـروف التسخين (مـثال فـرن الكـوك يظل باستمرار عند درجة حرارة عالية لسنوات ولكن المغـرفة يوميا يحدث لها تبريد) ، التحميل ، درجة العزل ، التجاوز لمعامل التمدد في الفرن ، إذا ما كانت هناك أجزاء متحركة من عدمه (كما هو الحال في الفرن الدوار والفرن النفقي) إلخ.
- عـوامل متعلقة بالتشغيل: العامل الهام هنا هو الطبيعة الكيماوية للمواد (مثل الخامـات ، مواد خفض درجة حرارة الإنصهار ، الوقود ... إلخ) الملتصقة

بالحـــراريات ، درجة الحرارة في الأجزاء المختلفة من الفرن ، التغيرات في درجة الحرارة ، سيولة العادن المنصهرة ، الخبث ، سرعة الغازات الملتصقة بطـــبقة الـــبطانة للفرن والبري الناتج عن حركة الشحنة ، الغازات ، المعدن المنصهر .

- عوامل إقتصادية : مع تقدير التكاليف الأولية لمختلف الحراريات إلا أن عمر الخدمة أثناء الإستخدام يجب أن يؤخذ في الإعتبارتكاليف تداول الحراريات ، الـــنقل ، وتكاليف وضع الطوب ، هي نفسها سواء تم استخدام أنواع جيدة أو متدنـــية من الطوب الحراري . وفي حالة استخدام أنواع متدنية وعمر خدمته قـــصير ، فإنـــه يلـــزم استبداله عادة .وهذا سوف يترتب عليه تكاليف تداول إضافية ، بالإضافة إلي الفقد في الإنتاج الناتج عن التوقف . لذلك فإن التكلفة الحقـــيقة للحـــراريات يجب إعتبارها علي أساس تأثيره علي التكاليف الكلية للإنتاج .

موجز الصفات وخواص الطوب الحراري

نوع الطوب	الخواص
عالي الألومنيا High - Alumina	مقاومة حرارية عالية ، والتي تزداد مع زيادة المحتوي من الألومنيا . قوة ميكانيكية عالية عند درجات الحرارة العالية . مقاومة مابين الممتازة والمعتدلة للتشظي. مقاومة أعلا (عن طوب الطفل الحراري) للتآكل بمعظم الخبث القلوي ومواد خفض درجة حرارة الإنصهار القلوي.
الطفل الحراري Fire - Clay	تختلف الخواص الطبيعية والكيماوية للطفل الحراري كثيرا ، لذلك فإن طوب الطفل الحراري ذو الخواص المختلفة كثيرا يكون متاحا . لهذا السبب كان استخدامه

نوع الطوب	الخواص
	مناسب في ظروف تشغيل مختلفة كثيرا . معظم طوب الطفل الحراري له مقاومة جيدة نسبيا بالنسبة للتشظي وكذلك قيمة جيدة للعزل الحراري . وله مقاومة مقبولة للخبث الحامضي ومواد خفض درجة حرارة الإنصهار ، ولكن المقاومة لهذه المواد القلوية (الخبث ومواد خفض الحرارة) تكون منخفضة .
السيليكا Silica	قوة مقاومة حرارية عالية، ومقاومة للبري . قوة ميكانيكية عالية عند درجات الحرارة المرتفعة . التوصيل الحراري عند درجات الحرارة العالية هو حوالي ٢٥% أعلا من ذلك لطوب الطفل الحراري . مقاومة عالية ضد تآكل الخبث الحامضي . مقاومة مقبولة لعدوانية أكسيد الكالسيوم (Lime)، أكسيد المغنسيوم وأكسيد الحديد . الخبث القلوي شديد العدوانية علي السيليكا وكذلك الفلورين شديد العدوانية. غير معرض للتشظي الحراري عند درجة حرارة أعلا من 650°م ، مقاومة ضعيفة للتشظي عند درجات الحرارة المنخفضة .
الماجنزيت Magnesite	له قوة مقاومة حرارية عالية وقدرة توصيل حراري عالي ، مقاومة عالية ضد التآكل بالخبث القلوي ، ضعف المقاومة للخبث المحتوي علي نسبة عالية من السيليكا. الطوب بالرباط الكيماوي أو بالغلاف المعدني له مقاومة جيدة ضد التشظي .

الخواص	نوع الطوب
مقاومة عالية للتآكل بفعل الخبث القلوي ومقاومة مقبولة للخبث الحامضي ومواد خفض درجة حرارة الإنصهار (Fluxes). عموما الخبث القاعدي لا يلتصق بطوب الكروم . في ظروف معينة غير عادية يمتص أكسيد الحديد ويسبب إنفجار خطير . التوصيل الحراري منخفض مقارنة بذلك الطوب الماجنيزيت ولكنه أعلا من ذلك الطوب الطفل الحراري .	الكروم Chrome
قوة ميكانيكية وثبات للحجم عند درجات الحرارة العالية . مقاومة ممتازة ضد التشظي . مقاومة عالية ضد التآكل بفعل الخبث القلوي .	الماجنزيت كروم Magnesite- Chrome
قوة ميكانيكية عالية وثبات للحجم عند درجات الحرارة العالية .مقاومة مابين الممتازة والجيدة للتشظي . مقاومة عالية للتآكل بفعل الخبث القلوي.	الكروم الماجنزيت Chrome – Magnesite
مقاومة حرارية عالية . قوة ممتازة عند درجات الحرارة العالية . مقاومة التآكل للمواد القلوية . مقاومة لمعظم الخبث القلوي . الخبث الحامضي عدواني ويسبب التآكل .	Forsterite $2MgO.SiO_2$

عموما الحرايات القلوية أقل مقاومة للصدمة الحرارية مقارنة بحراريات الألومنيا العالية . ولكن مقاومة التشظي لبعض الطوب القلوي ذات المكونات الخاصة تساوي ذلكلطوب الطفل الحراري ذو الإستخدام الخاص (Superduty Fireclay Bricks).

الطوب القلوي من أي نوع يمكن تغليفه بمعدن . هذا النوع من الطوب له مقاومة جيدة ضد التشظي – معظم الطوب بالغلاف المعدني هو من نوع المكونات من الماجنيزيت – كروم .

الفصل الثانى

2

اختبارات الحراريات

Testing of Refractories

الاختبار الصحيح للمواد الحرارية يمكن عمله على أساس المعلومات الكاملة عن ظروف الخدمة وخواص الحراريات. يتم تقييم الحراريات وذلك بالاختبارات المعملية. الخواص الآتية للحراريات تجرى لتقييم مناسبتها:

- نقطة الانصهار والتي تسمى كذلك نقطة الليونة.
- المقاومة الحرارية تحت التحميل.
- النفاذية.
- الكثافة الكلية.
- النفاذية.
- إجهاد الكسر على البارد.
- معامل التلف (modulus of rupture)
- مقامل التقشر (spalling resistance)
- التوصيل الحراري والمقاومة/ التوصيل الكهربي.
- مقاومة الاحتكاك، الخبث والأبخرة/ الغازات.

سيتم وصف طرق الاختبار للخواص السابقة في الآتي:

١- المقاومة الحرارية أو نقطة الانصهار:

المواد النقية تنصهر بدقة عند درجة حرارة محددة. معظم المواد الحرارية تتكون من حبيــبات ذات درجــة حــرارة إذابة مرتفعة ملتصقة مع بعضها. عند درجة الحرارة العالــية، ينــصهر الزجاج ومع ارتفاع درجة الحرارة، فإن الخبث الناتج يزداد كميا بالإذابة الجزئية للحبيبات الحراية. درجة الحرارة التي يحدث عندها هذا العمل تسبب فــشل هــرم الاختــبار (قمع الاختبار) في حمل وزنه والذي يسمى نقطة الانصهار الحراري. الجدول (الآتي) يوضح نقطة الانصهار لبعض المركبات النقية المستخدمة في الحراريات.

جدول يبين نقطة الانصهار للمركبات النقية:

المركب النقي	الرمز	نقطة الانصهار °م
الألومينا	Al_2O_3	٢٠٥٠
الجير الحي (lime)	CaO	٢٥٧٠
الكروميت	$FeOCr_2O_3$	٢١٨٠
أكسيد الكروم	Cr_2O_3	٢٢٧٥
المجنزيا	MgO	٢٨٠٠
السيليكا	SiO_2	١٧١٥
تيتانيا	TiO_2	١٨٥٠
المولايت mullite	$3AL_2O_3.2SiO_2$	١٨١٠
سيليمانيت Sillimanite	$Al_2O_3.SiO_2$	١٨١٦
Spinel	$Mgo.Al_2O_3$	٢١٣٠
كاربوندم Carborundum	SiC	صلب عند ٢٢٤٠
زركونيا Sirconia	ZrO_2	٢٦٧٧

نقطة الانصهار °م	الرمز	المركب النقي
٢٥٣٠	BeO	بيريليا berylia
صلب عند ٣٠٠٠	ThO_2	ثوريا
صلب عند ٣٦٠٠	C	الكربون

قمع المكافئ الحراري (Pyrometric Cone Equivalent)

درجة الحرارة التي عندها يفقد المقاوم الحراري شكله تحت وزنه يعرف بنقطة ليونته، والذي يعين بواسطة قمع المكافئ الحراري (PCE). الحراريات، بسبب تعقيداتها الكيماوية، فإنها تنصهر على التوالي خلال مجال من درجة الحرارة. القمع القياسي المكافئ الذي ينصهر إلى نفس الدرجة لقمع الاختبار يسمى قمع المكافئ الحراري (PCE). قمع المكافئ الحراري يبين فقط درجة حرارة لليونة ولكن في حالة الحرايات في الخدمة فإنها تكون معرضة للأحمال والتي تعمل على تغيير الشكل الحراري عند درجة حرارة أقل عن تلك المبينة بواسطة قمع المكافئ الحراري. مع التغير في الظروف البيئية مثل حالة الاختزال، فإن قيمة قمع المكافئ الحراري تتغير كثيرا.

عند بعض من درجة الحرارة ما بين تلك التي يبدأ عندها تكون السائل وتلك التي تكون عندها كل الطوبة في حالة سائله، يكون جزء السائل يصبح في حالة حيث تكون الطوبة غير قادرة على تحمل وزنها ويتغير شكلها ببطء. فإذا كانت عينة الاختبار في شكل هرم، ارتفاع ١,٥ بوصة على قاعدة مثلثة حيث كل جانب ٢/١ بوصة (طرف واحد من الهرم يكون عموديا على القاعدة)، مع تسخين العينة هذه بمعدل ٥٠ °م كل خمسة دقائق، فإن درجة الحرارة التي عندها إنحت العينة بحيث تصبح القمة في مستوى القاعدة حيث تسمى درجة الحرارة هذه بدرجة المقاومة الحرارية (refractoriness) . درجة الحرارة التي يحدث عندها هذا تزداد مع زيادة المحتوى من الألومينا.

السيليمانيت أو الطوب عالي الألومينا المحتوي على أكثر من ٧٢% Al_2O_3 لا يكون سائل عند ١٥٤٥ °م (مع التجاوز عن وجود مواد خفض درجة حرارة الانصهار fluxes) حتى الوصول إلى درجة حرارة ١٨١٠ °م. عند درجة الحرارة هذه فإن أي مولايت موجود فإنه يتحلل إلى سائل و كورندم (corundum هو أكسيد الألومينيوم الطبيعي). المقاومة الحرارية العالية لطوب السيليمانيت يمكن توضيحه بذلك. معظم الحراريات الأخرى لها نقطة انصهار (قيمة المقاومة الحرارية) أعلى من تلك التي عندها تعمل الأفران العادية.

الأقماع القياسية تسمى أقماع سيجر (Segar cones) وأقماع (Orto cones) وهي ترقم طبقا لمقاومتها الحرارية/ أو نقطة انصهارها.

متوسط درجة المقاومة الحرارية لبعض أنواع الطوب موضح في الجدول (٤)

الجدول لبيان متوسط قيم المقاومة الحرارية:

الطوب	رقم قمع سيجر	درجة المقاومة الحرارية مْ
السيليكا silica	٣٢ – ٣٤	١٧١٠ – ١٧٥٠ مْ
السيليكي siliceous	٢٨ – ٣١	١٦٣٠ – ١٦٩٠ مْ
الطوب الحراري (٢٣ – ٣٠% Al_2O_3)	٢٧-٣٠	١٦١٠ – ١٦٧٠ مْ
طوب حراري (٣٠ – ٣٥% Al_2O_3)	٢٨-٣١	١٦٣٠ – ١٦٩٠ مْ
طوب حراري (٣٥ – ٤٠% Al_2O_3)	٢٩-٣٣	١٦٥٠ – ١٧٣٠ مْ
طوب حراري الومنيومي	٣٢-٣٥	١٧١٠ – ١٧٧٠ مْ
سيليمانيت Sillimanite	٣٥	١٧٧٠ °م
ماجنيزيت magensite	٣٨	١٨٥٠ مْ
بوسكايت bauxite	٣٨	١٨٥٠ مْ
كروم	٣٨	١٨٥٠ مْ
كربيد السيليكون X	٣٨	١٨٥٠مْ

الطوب	رقم قمع سيجر	درجة المقاومة الحرارية مْ
كربون*	٣٨	١٨٥٠ مْ
زركونيا Zirconea	٣٨	١٨٥٠مْ

× مصمم للتحلل عند درجة حرارة منخفضة.

*يتحلل عدا في حالة المجال شديد الاختزال.

أرقام الأقماع الهرمية القياسية ودرجة حرارة انصهارها موضح في الجدول الآتي:

جدول المكافئ القياسي للقمع الحراري:

	قيمة قمع أورتون °م (مواصفات إنجليزية)	قيمة قمع سيجر °م (مواصفات ألمانية)
١٢	١٣٣٧	١٣٧٥
١٣	١٣٤٩	١٣٩٥
١٤	١٣٩٨	١٤١٠
١٥	١٤٣٠	١٤٤٠
١٦	١٤٩١	١٤٧٠
١٧	١٥١٢	١٤٩٠
١٨	١٥٢٢	١٥٢٠
١٩	١٥٤١	١٥٣٠
٢٠	١٥٦٤	١٥٤٠
٢٣	١٦٠٥	١٥٦٠
٢٦	١٦٢١	١٥٨٥
٢٧	١٦٤٠	١٦٠٥
٢٨	١٦٤٦	١٦٣٥
٢٩	١٦٥٩	١٦٥٥
٣٠	١٦٦٥	١٦٨٠
٣١	١٦٨٣	١٦٩٥

	قيمة قمع أورتون °م (مواصفات إنجليزية)	قيمة قمع سيجر °م (مواصفات ألمانية)
٣١,٥	١٦٩٩	–
٣٢	١٧١٧	١٧١٠
٣٢,٥	١٧٢٤	–
٣٣	١٧٤٣	١٧٣٠
٣٤	١٧٦٣	١٧٥٥
٣٥	١٧٨٥	١٧٨٠
٣٦	١٨٠٤	١٨٠٥
٣٧	١٨٢٠	١٨٣٠
٣٨	١٨٥٠	١٨٥٥
٣٩	١٨٨٠	١٨٧٥
٤٠	١٩٢٠	١٩٠٠
٤١	١٩٦٠	١٩٤٠
٤٢	٢٠٠٠	١٩٨٠

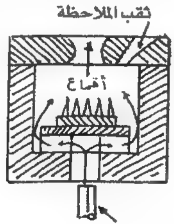
معدة اختبار القمع الهرمي لتعيين المقاومة الحرارية/ نقطة الليونة سيتم توضيحها في الآتي:

اختبار مكافئ القمع الحراري Pyrometric Cone Equivalent)

الغرض من هذا الاختبار هو لتعيين نقط الليونة للمادة الحرارية بمقارنة أقماع الاختبار المعـدة من المادة الحرارية تحت الاختبار بالأقماع القياسية التي يتم تسخينها في فرن مناسب. الأقماع المجففة تستخدم لدراسة مقارنة لمادة غير معلومة مع السلوك المعلوم للأقماع المستخدمة ولكن بهذه الطريقة فإننا نحصل على نتائج في مجال درجة حرارة ± ١٥ °م.

الفرن الذي يتوفر فيه جو متعادل أو مؤكسد باستمرار يفضل لهذا الاختبار. يتم طحن المادة الحرارية بعد أخذ العينة المناسبة وتقسم إلى أربع لتمر خلال المنخل رقم (IS No

(20 لتجــنب الخفض الكبير في القطر. كمية معينة من المادة المحدد حجمها يتم أخذها وبمــساعدة مع كمية من المادة الرابطة (مثل الغراء أو الدكسترين) وإضافة الماء يتم إعــداد مكافــئ القمع الحراري. العينة التي تم إعدادها تكون بمقياس ٨ مليمتر على أجــناب القاعــدة وارتفاع ٢٥ مليمتر. عند الجفاف لأقماع الاختبار والأقماع القياسية الحــرارية يــتم وضعهم على لوحة من مادة حرارية ذات التكوين الذي لا يؤثر على انصهار الأقماع. أقماع الاختبار التي تم إعدادها يتم وضعها في الفرن وتسخين الفرن كهربيا. يتم تجنب حالات الاختزال في الفرن أثناء التسخين وكذلك يجب تجنب توجيه اللهب مباشرة نحو الأقماع أو اللوح الحامل لها. يتم اختبار الفرن على مراحل بالنسبة لتجانس توزيع الحرارة. ليونة القمع ستظهر بانحناء القمة نحو طرف سطح اللوح. يتم تسجيل نقطة الليونة بالنسبة للقمع القياسي الحراري والذي يقابل في نفس الوقت الليونة مع قمع الاختبار. فرن نقطة الانصهار (بالوقود الغازي) موضح في الشكل (٣/٩).



شكل (٩) فرن نقطة الأنصهار يعمل بحرق الغاز

المقاومة الحرارية تحت الأحمال:

هــذا الاختــبار يعــين درجة حرارة الليونة للحرايات تحت الأحمال المبين إما بالإنسلاخ والهبوط إلى أسفل أو الكسر لعينة الاختبار. يتكون فرن الاختبار (بالتسخين الكهربــي) من أنبوبة تسخين بقطر داخلي ١٠٠ – ١٢٠ مليمتر وطول حوالي ٥٠٠

مليمتــر وســمك الجدار ١٥ – ٢٠ مليمتر. تستخدم مواسير التسخين من الكورندم أو الماجنــزيت....الخ. منطقة أقصى تجانس في درجة الحرارة يكون أدنى طول لها هو ١٢٠ مليمتر.

تنظــيم استخدام التحميل يكون بحيث استخدام حمل ٢ كجرام/ سم٢ بوضع عمود علــى عيــنة الاختبار. يتم الإعداد لتسجيل التغيرات في ارتفاع عينة الاختبار وكذلك لانــضغاطها بمــا لا يقل عن ٢٠ مليمتر. عينة الاختبار من الطوب الجاري اختباره تكــون في شكل اسطوانة بقطر ٥٠ مليمتر وارتفاع ٥٠ مليمتر مأخوذة بعد عمل ثقب فــي الجزء المركزي من الطوبة. يستخدم العمل بواسطة قضبان من الكربون أو من المــولايت. أعمــدة الكربون ذات قطر من ٥٥ – ٦٠ مليمتر يتم فرضها بين عينتين اختبار. ترفع درجة الحرارة بمعدل حوالي ١٥ ° م في الدقيقة حتى ١٠٠٠ °م وأعلى من ١٠٠٠ °م بمعدل ثابت ٨ °م في الدقيقة. درجة الحرارة في اللوح الأفقي قد تتغير كثيــرا، أقصى اختلاف المسموح به في المنطقة الساخنة هو ٢٠ – ٣٠ °م. يتم توقيع التغير في الطول مقابل الوقت في إحداثيات مستطيلة. مع ارتفاع درجة الحرارة بمعدل ثابت تقريبا وتوقيع التغير في الارتفاع بالنسبة للوقت، هذا المخطط يوفر منحنى تغير الــشكل طبعا للتغير في درجة الحرارة (temperature deformation curve) . يتم قياس درجة الحارة بواسطة الحراري البصري (optical pyrometer) يرى ويضبط فوق قاع الأنبوب الحراري المقفلة عند القاع ومعلقة في الفرن عند بداية الاختبار عند المنتصف تقــريبا لعيــنة الاختبار. عندئذ يلزم توفير جهاز حساس لقياس التغير في الشكل كل دقــيقة. تعطــي النتائج الآتية بالإضافة إلى المنحنيات التي تم توقيعها. درجة الحرارة (Ta) التي تبين النقطة التي عندها يهبط المنحنى ٣ مليمتر أسفل أعلى نقطة ، (Te) هي درجــة الحرارة التي عندها نقص ارتفاع العينة بعدد ٢٠ مليمتر من ارتفاعها الأصلي نتــيجة الكسر (قبل الأوان) وعند عدم حدوث الليونة الحقيقية، استبدل درجة الحرارة. (T_b) تــشير إلى نقطة الانكسار لدرجة الحرارة (Te). تكون درجة الحرارة الصحيحة لأقرب ١٠ °م.

المقاومـــة الحرارية للمنتج تكون أقل في الأهمية عن المقاومة تحت التحميل. في جمـــيع إنشاءات الأفران، تكون إنشاءات الطوب معرضة للإجهاد. هذا ناتج عن أثقال أحمـــال الطوب الفوقية، بفعل القوة الدافعة للقوس، أو نتيجة الضغط الناتج عن فاصل الـــتمدد الغيـــر مناسب. هذا الضغط يمكن أن يسبب تغير في شكل الطوبة عند درجة حرارة أقل كثيرا عن نقطة انصهارها. هذا التأثير واضح خاصة في الطوب الحراري. تحـــت الأحمال ٢ كجرام/ سم^{٢} (القياس المستخدم لهبوط هذا النوع من الطوب) يحدث هبوط حوالي ٥% عند درجة حرارة ٢٠٠ °م أقل من نقطة الانصهار.

مـــن الناحية العملية، يكون وجه واحد من الطوب عند أعلى درجة حرارة، بحيث أنه أحيانا يمكن للجزء البارد من الطوب أن يتحمل الحمل عندما تكون درجة حرارة وجه التشغيل أو الطوبة من المتوقع أن تنهار. الصفة المميزة للحراري تشمل المعرفة عن نظـــام حجم وطبيعة المسامية بالنسبة للمادة الصلبة، وحجم وثقوب الكسر، ووجود أو عدم و جود عيوب في الصناعة. الصفة تتوقف على خواص المادة الحرارية، مقاومة التقـــشر والاحـــتكاك والخبث والتوصيل الحراري. بالنسبة للمنتجات الحرارية يكون الـــتحكم فـــي الخواص طبقا لحجم الطفلة، طبيعة التدرج للكسر (grog)، درجة حرارة الحرق واستمرارها.

نعومة الحبيبات تساعد على التزجيج (vitrification). الطوب بالشكل الرقيق يتوقع أن يلـــين تحت حمل عند درجة حرارة أقل قليلا عن المنتج الخشب بنفس المكونات. بعض قيم المقاومة الحرارية تحت الأحمال لبعض أنواع الطوب موضحة في الجدول الآتي:

جدول لمتوسط قيم المقاومة الحرارية تحت الأحمال:

الطوب الحراري	المقاومة الحرارية تحت الأحمال ٢ كجرام/ سم^{2} = ٢٨ رطل/ البوصة المربعة	
	رقم قمع سيجر	درجة الحرارة °م
السيليكا	٢٩ – ٣٢	١٦٥٠ – ١٧١٠
السيليكي siliceous	١٨ – ٢٧	١٥٠٠ – ١٦١٠
الطوب الحراري (٢٥ – ٣٠% Al_2O_3)	١٣ – ١٦	١٣٨٠ – ١٤٦٠
الطوب الحراري (٣٥ – ٣٨% Al_2O_3)	١٩ – ٢٦	١٤٦٠ – ١٥٢٠
الطوب الحراري عالية الألومينا (٣٨ – ٤٥% Al_2O_3)	٢٦ – ٢٩	١٥٨٠ – ١٦٥٠
سيليمانايت sillimanite	> ٢٩	> ١٦٥٠
الماجنيزيت	١٨ – ٢٨	١٥٠٠ – ١٦٣٠
الكروم	١٢ – ١٦	١٣٥٠ – ١٤٦٠
Chrome magnesite	١٨ – ٣٢	١٥٠٠ – ١٧١٠
Silicon carbide	> ٣٤	> ١٧٥٠
الكربون	> ٣٤	> ١٧٥٠
الزركونيا	١٨ – ٢٠	١٥٠٠ – ١٥٣٠

التغير الخطي الثابت عند إعادة التسخين

Permanent Linear Change (PLC) on Reheating

ثبات الحجم، التمدد والانكماش عند درجات الحرارة المرتفعة: انكماش أو تمدد الحراريات يمكن أن يحدث أثناء الخدمة، مثل هذه التغيرات المستديمة في الأبعاد يمكن أن تكون بسبب الآتي:

- التغيرات في الأشكال التأصلية (موجود بشكلين مختلفين أو أكثر allotropic forms) والذي يسبب تغير في الجاذبية النوعية.

- التفاعل الكيماوي المنتج لمادة جديدة ذات جاذبية نوعية مختلفة.
- تكوين المجال السائل.
- تفاعلات التحميص (sintering).

يمكن أحيانا أن يحدث بسبب مادة خفض درجة الحرارة الانصهار (fluxing) مع الخبث أو الأتـــربة أوبفعل القلويات أو حراريات الطوب الحراري، لتكوين سيليكات الألومينا القلـــوية، مسببا التمدد والتمزق. هذا مثال الذي يلاحظ في الأفران العالية. بينما يكون المفــضل هـــو تأثـــر كـــل هذه التغيرات أثناء التصنيع، إلا أن ذلك مستحيل لأسباب اقتـــصادية. التغيـــر الخطـــي الثابت عند إعادة التسخين والتبريد للطوب يبين الثبات الحجمي للمنتج وكذلك الطريقة المناسبة لمعايير العمل أثناء التصنيع.هذا واضح خاصة عند قياس درجة التغير التي تتم في صناعة طوب السيليكا.

التمدد الحراري العكسي:

أي مـــادة عـــند تـــسخينها فإنها تتمدد وتتقلص بالبرودة. التمدد الحراري العكسي هو انعكـــاس على انتقالات المجال التي تحدث أثناء التسخين والتبريد. يتم مراعاة التغير الخطـــي الثابت والتمدد العكسي الحراري في تصميم البطانة الحراية بالنسبة لوصلات التمدد.

كقاعدة عامة، تلك ذات معامل تمدد حراري منخفض أقل عرضة للتقشر الحراري.

اختبار ثبات التغير الخطي عند إعادة التسخين:

يـــتم الاختبار في فرن المعمل باستخدام قطع من الطوب الحراري بحجم محدد (طبقا للمواصـــفات الدولـــية IS) والتسخين عند درجة حرارة معينة لمدة زمنية معينة (طبقا للمواصفات) ثم يتم تسجيل النتائج بطريقتين: (أ) التغير الطولي (ب) التغير الحجمي. لتـــسجيل النـــتائج بالنسبة للتغير الطولي، فإن طول العينة الأصلية يتم قياسه بواسطة الورنيه (vernier) وبعد التسخين يتم قياس الطول بنفس جهاز القياس. التعبير عن ثبات التغير الخطي يتم بالنسبة المئوية للزيادة/ النقص في الطول كالآتي:

النسبة المئوية لثبات التغير الخطي عند إعادة التسخين (الطول) =

$$= \frac{\text{الزيادة/ النقص في الطول} \times ١٠٠}{\text{الطول الأصلي}}$$

بالمـثل في حالة الطريقة الحجمية، الحجم قبل وبعد الحرق يتم قياسه وتسجيل النتيجة كالآتي:

النسبة المئوية لثبات التغير الحجمي عند إعادة التسخين (الحجم) =

$$= \frac{\text{الزيادة/ النقص في الحجم} \times ١٠٠}{\text{الحجم الأصلي}}$$

تعيين التغير الخطي الثابت: (Permanent Linear Change*)

قطعــة اختبار من الطوب الحراري (الأبعاد ٥ × ٥ × ١٢,٥ سم) يتم قطعها بواسطة عجلــة القطــع مــن شكل حراري معين وتوضع في فرن به مجال مؤكسد. في حالة الاشــكال الأصغر للحراريات، فإن العينة ذات الحجم الأكبر يتم قطعها بالطريقة التي تحــافظ بها على أكبر عدد من الأوجه الأصلية لاختبار الحراري مع التأكيد على أن بناءها لم يحدث له تلف.

الوجه الاكبر لعينة الاختبار يوضع على حامل من الطوب الحراري مسحوبا من نفس الحــراريات تحــت الاختبار أو تلك التي لها نفس المقاومة الحرارية. يجب التأكد من عــدم التصادم المباشر للهب على العينة من الموقد. يتم وضع الألومينا المنصهرة أو (kyanite) (للمــنخل القياسي – ٨٥ ميكرون) ما بين الحراري الحامل وقطع الاختبار. عــند وضع أكثر من عينة اختبار في الفرن، فإنه يتم وضعهم بفواصل ٤ سم بين كل منهم أو بعيدا عن جدار الفرن بنفس المسافة.

تــسخين الفــرن يــتم طبقا لجدول الوقت. درجة الحرارة حسب نوع الحراري تحت الاختــبار. بعد استمرار عينة الاختبار عند أقصى درجة حرارة مطلوبة لفترة زمنية معيــنة، يتم تبريدها لدرجة حرارة الغرفة لمدة ١٠ ساعات في الفرن المقفل نفسه. يتم قياس الزيادة في حجم عينة الاختبار ثانيا بعد أخذها من الفرن وإزالة القشور الصغيرة

من سطح العينة. يتم عندئذ حساب التغير الطولي على اساس التغير الحجمي بالعلاقات الآتية:

النسبة المئوية للتغير الحجمي % = الحجم النهائي – الحجم الأصلي × ١٠٠
الحجم الأصلي

أو النسبة المئوية للتغير الخطي (الطولي) =الطول النهائي–الطول الأصلي×١٠٠ م
الطول الأصلي

الجـــدول الآتي يوضح الجدول الخاص بالوقت – درجة الحرارة لبعض أنواع الطوب الحراري بجدول (٧).

الــوقت منذ بدء التسخين	الطفل الحراري	ســـــــيليمانيت الحراري	حــراريات السيليكا	الحــــــراريات القلــوية للخدمة العامة	حـــــــراريات العزل
١ ساعة	٧٥٠ – ١٠٠٠ °م	٩٠٠–١٠٠٠ °م	–	٧٥٠–٨٥٠ °م	٥٦٥ – ٩٦٥ °م
٢ ساعة	١١٥٠–١٣٢٥ °م	١٢٧٥–١٣٢٥ °م	–	١٢٧٥–١٣٢٥ °م	٧٧٠–١٣٠٠ °م
٣ ساعة	١٢٥٠–١٤٠٠ °م استمراره ساعات	١٣٧٥–١٤٠٠ °م	–	١٣٧٥–١٤٠٠ °م	٨٥٠–١٢٥٠ °م استمرار ٢٤ ساعة أقصى ١٤٧٠ °م
٣,٥ ساعة	حتى ١٤٥٠ °م استمرار لمدة ٢ ساعة إضافية				
٤ ساعة	١٥٠٠ °م اســـتمرار لمدة ١ ساعة	١٥٠٠ °م اســتمرار لمدة ٥ ساعة أخرى –			
٥ ساعة	١٥٥٠ °م اســتمرار لمدة ساعة أخرى –		حتى ٨٠٠ °م	١٦٠٠ °م استمرار لمدة ساعتين أخرى	
٦ ساعة ١٤٥٠ مْ استمرار لمدات ٥ ساعات اخري					

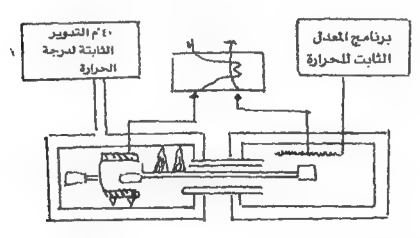
في اختبار ثبات التغير الخطي (الطولي) فإن مجمرة الفرن يجب أن تكون ذات درجة حرارة متجانسة والتي تقاس بواسطة ثيرمو كامل (pt-pt/Rh) حتى ١٤٥٠ °م وبوساطة

المقياس الحراري البصري (optical pyrometer). عند زيادة درجة الحرارة عن ١٤٥٠ °م. أقصى تغير في درجة الحرارة يجب أن يكون ± ١٠ – ١٥ °م طبقا ما إذا كانت درجة الحرارة المقاسة أقل أو أكبر من ١٤٥٠ °م. يتم تسجيل درجة حرارة الفرن كل ١٥ دقـيقة لاستمرار ثبات درجة الحرارة. درجة حرارة إعادة التسخين النهائية لقطع الاختـبار تـتوقف على نوع الحراري وبالتالي مقاومته الحرارية كما هو موضح في الجدول السابق.

اختبار الطريقة التمددية (لقياس نقط تحول السائل بمراقبة تمدده) لثبات التغير الطولي:

(Dilatometric Method of PLC Test

جهاز الاختبار بالطريقة التمددية المستخدم في قياس التغير الطولي في عينة الحراري مع درجة الحرارة موضح في الشكل (٣/١٠).



شكل (١٠) طريقة قياس التمدد الحراري

قطعـة الاختبار الاسطوانية (بعد نظافة سطحها من الأتربة....الخ) من الحراري يتم وضعها ليكون أحد نهايتيها على أنبوب حامل بحيث يكون الطرف الآخر حرا للتمدد. هـذا الطـرف الحـر للقطعة يتم توصيله بقلب (core)، بمحول الإزاحة الإليكتروني للطاقة. يتم تسخين العينة واي تغير في الطول يحرك الطرف الحر للقضيب السيراميك الذي يدفع قلب المحول والذي ينتج عنه انحراف يتم تسجيله بالمليفولت والذي يتناسب

مــع التغير في طول العينة. تتم المعايرة القياسية للمحول (transducer) باستخدام عينة قياسية ذات معامل تمدد معلوم حيث من تعيين معامل التصحيح للتمدد الذي يحدث في الأنبوب السيراميك والحراري الحامل عن التسخين في نفس الوقت مع العينة.
تحليل التمدد الطولي يساعد كذلك في تعيين التغيرات البنائية ونسبة المجالات المختلفة المــتكونة بسبب الانتقال بالتسخين والذي يشمل التغير في الحجم الكلي لعينة الحراري فمــثلا النسبة المئوية في طوب السيليكا عند التسخين إلى درجة الحرارة المطلوبة من المكونات (Quartz, Tridymite, Cristobalite).

تأثير إعادة الحرق على ثبات الحجم:

Effect of Refiring on Volume Stability

أثناء حرق الحراري فإن الأداء والتغير الكيماوي والطبيعي يتوقف قبل أن يكتمل. أثناء حرق الطوب الحراري، مثلا، الأداء الذي يحدث ينتج عنه كمية معينة من الانكماش. إذا كــان هــذا الأداء غيــر كافي الاكتمال، فإن هذا الانكماش يمكن أن يستمر أثناء الاســتخدام. إذا كــان هذا الانمكاش فيما بعد كبيرا، فإن طوب الفرن سوف تحدث له إزاحة، تفتيح للوصلات، والتشققات وكذلك التفكك. بالنسبة لمنتجات الطفل الحراري، فإن الانكماش التالي بنسبة ١% بعد الحرق لمدة ساعتين وعند ١٤٠٠ °م يعتبر عاليا. درجــة الحــرارة الحيقيقة التي عندها يجب اختبار الطوب والانكماش التالي (after-contraction) يــتوقف على ظروف الخدمة في حالة طوب السيليكا، فإن معالجة الفرن تــؤدي إلى التمدد، ولكن التفاعلات عموما تتوقف قليلا قبل أن تكتمل. أثناء الاستخدام عــند درجات الحرارة العالية، فإن الكوارتز المتبقي يمكن أن يتحول إلى أشكال ذات كــثافة أقــل مــع احتمال حدوث نمو. هذا النمو سوف يحدث حتى ضد قوى الضغط العالية لذلك فإن التمدد التالي لطوب السيليكا يجب أن يكون قليلا.
طــوب الماجنيزيت ينكمش أثناء الحرق بسبب تبلور البيريكليز (periclase- MgO) مثل الماجنــسيا الأصــلية الــلا بلــورية (amorphous). طــوب الكروم وطوب الكروم الماجنيــزيت يمكن أن ينكمش أو أن يتمدد. جو الفرن يلعب دورا خطيرا مع الطوب

المحـتوي علـى خـام الكروم. الحرق المناسب دائما يكون ضروريا لإمكان حدوث التفاعلات قريبا من الاكتمال ما أمكن.

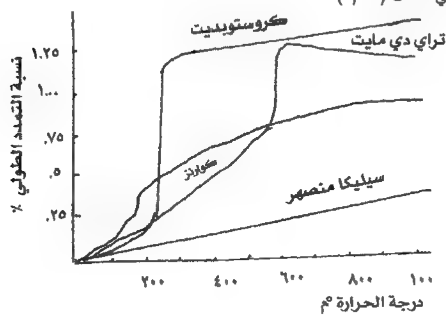
التمدد الحراري (Thermal Expansion)

الـتمدد الحـراري العادي أو العكسي لمواد الإنشاء له مغزى معين حيث يجب عمل بعض التجاوز لاحتوائه في تصميم الفرن. التمدد الحراري للحراريات يعتبر عامل هام في تعيين مقاومتها للصدمة الحرارية.

عموما، التمدد الحراري أعلى قليلا من ١٠٠٠ °م. عند درجات الحرارة العالية، معظم الحراريات يحدث لها كمية معينة من الانهيار بسبب ليونة الرباط، وبعض التمدد يمكن عندئذ أن يحدث خلال الطوب نفسه.

الطـوب الحـراري له تمدد حراري متجانس حتى ١٠٠٠ °م، وهذا عموما يكون في حدود ≥ ٠,٥ % أو أقل. طوب السيليكا سلوكه يختلف إلى حد ما.

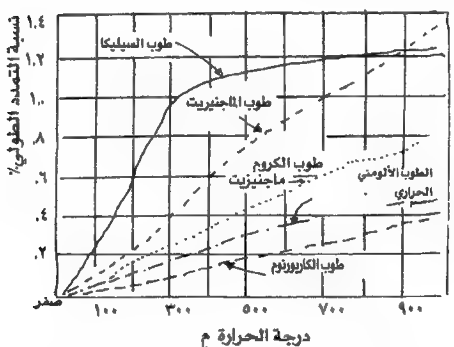
طوب السيليكا يبين كل من تلك عدم الاستمرارية في منحنى تمددها الحراري، كما هو موضح في الشكل (٣/١١).



شكل (١١) تمدد طوب السيليكا

منحنى اختبار التمدد الحراري لطوب السيليكا، أو للمنحنى المرتبط بمعامل التمدد مع درجـــة الحرارة، يعطي بيان جيد عن مكونات الطوب. التمدد الحراري الكلي لطوب السيليكا ما بين صفر °م و ١٠٠٠ °م عادة يكون من ١,٢ – ١,٣ %.

الـــتمدد الحـــراري لطوب الماجنيزيت. مرتفع بالمقارنة، من ١,٣ – ١,٤ %، وذلك لطـــوب الكروم أو لطوب الكروم الماجنيزيا فإن الطوب يكون أقل كثيرا عدا في حالة الجو المختزل. السيليمانيت له تمدد حراري منخفض حوالي ٠,٥ عند حتى ١٠٠٠ °م. طوب السيليكون كاربيد هو بنفس الدرجة ولكن التمدد الحراري لطوب الكورندم أعلى (حوالي ١%). التغير في التمدد الحراري لبعض أنواع الطوب الحراري طبقا لدرجة الحرارة مبين في الشكل (٣/١٢).



شكل (١٢) التمدد الطولى العكسى للحراريات

سمك وصلات الطوب يتأثر طبقا لخواص كلا من الطوب ومونة الرباط، ونوع الرباط المستخدم، والتجاوز المستخدم للتمدد الحراري للطوب. أحيانا في استخدامات خاصة لا

تستخدم مونه رباط. ولكن مونة الرباط يجب أن تكون رقيقة ما أمكن ذلك.

التمدد الحراري العادي والتجاوزات للطوب الحراري موضح في الجدول الآتي:

جدول التمدد الحراري والتجاوز للطوب الحراري:

نوع الطوب	التمدد الحراري العادي (مليمتر/ المتر) عند درجة حرارة التشغيل	سماح التمدد للمتر عند درجة حرارة التشغيل
الطوب الحراري	٧,٨١	٠,٧ مليمتر
عالي الألومينا ٥٠-٨٠% ألومينا	٧,٨١	٠,٧ مليمتر
عالي الألمومينا بأكثر من ٨٠% ألومينا	١٠,٤٢	١ مليمتر
السيليكا	١٥,٦٣-١٣,٠٢	١,٣ مليمتر
طوب الماجنيزيت وطوب المجانيزيا-كروم (المحروق)	٢٠,٨٣	١,٩ مليمتر
طوب الكروم- المجانيزيا (الربط الكيميائي)	١٨,٢٣	١,٧ مليمتر

المواد المستخدمة لملئ وصلات التمدد هي إما أن تكون قابلة للاحتراق أو اللانضغاط. التمدد الرأسي في الحوائط يسمح لها للارتفاع لأعلى بحرية، بينما التمدد الأفقي يراعى بتوفير وصلات التمدد الرأسي. المنشأ المعدني المتسخدم لاحتواء الفرن يحدث له تسخين ولكن بدرجة أقل كثيرا، بسبب درجة الحرارة المنخفضة نسبيا مقارنة بالطوب الحراري. وصلات التمدد المتوفرة في الحوائط الحرارية يتم ضبطها لاحتواء التمدد للإنشاء المعدني. التجاوز والاستعداد المسبق للتمدد الحراري للطوب الحراري يختلف طبقا لأبعاد الحائط، معامل التمدد الحراري للحراريات، ومعامل التمدد الحراري للمنشأ المعدني، نوع العزل المستخدم، طبيعة مونة الرباط، وظروف التشغيل.

رغم أن وصلات التمدد المناسبة يجب توفيرها، فإنها يجب ألا تزيد عن حد الأمان، بما يضعف المنشأ. التمدد الحراري الطولي (عند ٥٤٠ °م %) لبعض مواد الإنشاء مثل الحديد الزهر، الأسمنت البيورتلاندي والصلب (٠,٢ % كربون) هي على التوالي ٠,٨٢ ، ٠,٦٧٥ ، ٠,٨٧٥ .

النفاذية (Porosity)

الـــنفاذية الظاهــرية هـــي قياس حجم المسام المفتوحة، التي يمكن أن يتخلل خلالها السائل، كنسبة من الحجم الكلي. وهذه خاصية هامة في حالة التصاق الحراري بالخبث المنصهر. النفاذية الظاهرية المنخفضة مطلوبة ذلك لأنها تمنع سهولة الاختراق لحجم الحـــراري واستمرار المسام سيكون تأثير هام على سلوك الحراري. يفضل عدد كبير مـــن المسام الصغير. بعدد مكافئ للمسام الكبيرة. ولكن، قياس المسامية الحقيقية الذي يأخـــذ فـــي الاعتـــبار المسام المقفلة، يوفر فكرة مقبولة لشكل المادة، وكذلك خواص التحميص.

تعيين النفاذية:

فـــي مادة الحراريات الخام الخضراء تكون كل المسام مفتوحة والسيول يمكن أن تمر خلالها. عند حرق هذه المواد يحدث تكون لبعض من السائل بسبب حدوث الانصهار ونتيجة لذلك فإن بعض المسام يتم قفلها. المسامية الظاهرية لذلك تأخذ المسام المفتوحة وليس المسام المقفلة. المسامية الحقيقية تعرف بالآتي:

$$\text{المسامية الحقيقية} = \frac{\text{حجم المسام المفتوحة} + \text{حجم المسام المقفلة}}{\text{الحجم الخارجي}} \times ١٠٠$$

$$\text{المسامية الظاهرية} = \frac{\text{حجم المسام المفتوحة}}{\text{الحجم الخارجي}} \times ١٠٠$$

طريقة نقطة الغليان:

المسامية الظاهرية لعينة صغيرة نظيفة (مقاس ٦,٥ × ٦,٥ × ٤سم) يتم قياسها بعمل ثلاثة أوزان. الأول هو العينة الجافة، والثاني العينة المشبعة المغمورة في الماء والثالثة العيـــنة المشبعة العالقة في الهواء. للتأكد من أن العينة مشبعة تماما فإنه يتم غليها في الماء لمدة ساعتين. النفاذية الظاهرية تحدد من هذه الأوزان بواسطة المعادلة:

نسبة النفاذية الظاهرية % = $\frac{D-W}{A-W}$ × ١٠٠

حيث:

W = وزن العينة المشبعة في الهواء.

D = وزن العينة الجافة في الهواء (مجففة عند ١١٠ °م في فرن)

A = وزن العينة المشبعة المغمورة في الماء.

تعيين المسامية الكلية (بما فيها المسامية المقفلة) يتم بطحن العينة جيدا لتفتيح كل المسام وقياس الكثافة الحقيقية (بطريقة – pyconometer). إجمالي المسام يتم حسابه بالآتي:

$$P = \frac{d_1 - d_2}{d_1} \times 100$$

حيث:

d_1 = الكثافة الحقيقية.

d_2 = الكثافة الكلية.

P = نسبة المسام الكلية بالنسبة للحجم الكلي × ١٠٠

تعيين المسامية الظاهرية بالتفريغ أو بطريقة المجفف المفرغ:

عينة اختبار نظيفة من الحراري (بحجم ٦,٥ × ٦,٥ × ٤سم بعجلة القطع من قلب الشكل الحراري لاختبارها) يتم تجفيفها عند ١١٠ °م في فرن إلى الوزن الجاف (D) مع المحافظة على الدقة ٠,١ جرام. العينة الجافة يتم وضعها في مجفف تفريغ خالي (empty dry desicator) والذي يتم تفريغه إلى ضغط أقل من ٢٥ مليمتر زئبق. يتم تغطية عينة الاختبار بواسطة سائل غمر (ماء أو جزء من سائل البرارافين المغلي عند درجة حرارة أعلى من ٢٠٠ °م). يستمر وضع العينة تحت الضغط المنخفض لمدة ٥ – ٦ ساعة حيث بعد ذلك يسمح بدخول الهواء على المجفف. عينة الاختبار المعلقة في

حبل أو في شبكة حبال يتم وزنها (s) بينما تظل عالقة في سائل الغمر.

يتم عندئذ رفع عينة الاختبار ببطء من سائل الغمر بواسطة خيط التعليق. نقاط السائل علـــى الـــسطح يتم إزالتها بواسطة الالتصاق الخفيف مع قطعة من الورق النشاف مع الـــتأكد مـــن عدم التصاقها مع سطح العينة نفسه. العينة المشبعة (soaked) يتم عندئذ وزنهـــا (s) بيـــنما تظـــل عالقـــة في الهواء. النفاذية الظاهرية (P) يتم عندئذ حسابها بالمعادلة:

$$P = \frac{W - D}{W - S} \times 100$$

من الصعب الحصول على قيمة نموذجية للنفاذية لمختلف أنواع الطوب الحراري حيث يتوقف ذلك على معايير كثيرة. نفاذية الطوب الحراري قد تتراوح ما بين ١٢ – ٢٥% أو أكثر، تلك لطوب السيليكا من ٢٠ – ٣٠%.

الكثافة الكلية/ الجاذبية النوعية

Bulk Density Specific Gravity

الـــصفة المفـــيدة للحراريات هي الكثافة الكلية، والتي تعرف المادة الموجودة في حجم معين. زيادة الكثافة لحراري معين يزيد من ثباتها الحجمي وطاقتها الحرارية، وكذلك مقاومة اختراق الخبث.

تعيين الكثافة الكلية:

كثافة أي حراري يتم قياسها بالمعادلة:

الكثافة = الوزن الكلي للحراري / الحجم الكلي

يتم قياس الكثافة باستخدام طريقة القياس المباشر أو طريقة القياس المباشر للحجم.

طريقة القياس المباشر:

عيـــنة الاختـــبار المستطيلة للحراري يتم وزنها بدقة (إلى أقرب ٥٠ جرام) وتسجيل

أبعادهـــا باســـتخدام مسطرة قياس لحساب حجمها. يتم حساب الكثافة الكلية باستخدام المعادلة:

$$B = \frac{W}{V}$$

حيث:

B = الكثافة الكلية للطوب جرام/ سم^3

W = وزن عينة الاختبار بالجرامات.

V = حجم عينة الاختبار سم^3.

طريقة القياس المباشر للحجم:

عيـــنة الاختبار للحراري بمقاس ٦,٥ × ٦,٥ × ٤ سم يتم نظافتها من الأتربة العالقة. يـــتم تـــسجيل وزنها الجاف (D) (وذلك بعد تجفيفها عند ١١٠ °م في فرن تجفيف إلى الوزن الجاف بدقة حتى ٠,١ جرام). يتم عندئذ وضع العينة الجافة في مجفف التفريغ حـــيث يتم التفريغ إلى ضغط أقل من ٢٥ مليمتر زئبق. يتم عندئذ تغطية العينة بسائل غمـــر (مـــاء أو البارافين السائل المغلي عند درجة حرارة أعلى من ٢٠٠ °م) ويظل تحت الضغط المنخفض لمدة ٥ – ٦ ساعة حيث يلي ذلك دخول الهواء إلى المجفف. الوزن العالق لعينة الاختبار (s) يتم تعيينه بإمساكها في خيط أو شبكة من الخيط بينما تظـــل عالقـــة فـــي سائل الغمر. يتم عندئذ رفع العينة ببطئ من سائل الغمر بواسطة الخـــيط. الوزن المشبع (W) لعينة الاختبار يتم تعيينه بوزن العينة المشبعة (بعد إزالة نقـــاط السائل من سطح العينة بواسطة ورق نشاف) وهي عالقة في الهواء. يتم عندئذ حساب الكثافة الكلية بالآتي:

$$B = \frac{D}{W - S}$$

طـــريقة القياس المباشر للحجم (عادة تستخدم للحراريات الغير منتظمة) لإعطاء نتائج أكثر دقة عن طريقة القياس المباشر (تستخدم للأشكال الغير منتظمة للحراري فقط).

هذه واحدة من البيانات لتقييم الاعتبارات النوعية لطوب معين.

الجاذبية النوعية الحقيقية لمادة مكون الطوب المميزة من الكثافة الكلية الطوب ككل (بما فيها ماسحات المسام) ذات أهمية خاصة لطوب السيليكا فقط وطوب الماجنيزيت. هذا يرجع إلى ثبات مكونات لأنواع الطوب الأخرى غالبا.

أنواع معينة من السيليكا لها جاذبية نوعية مختلفة، الكوارتز له جاذبية نوعية ٢,٦٥ ، الكريستوبالايت ٢,٣٣ ، التراي ديمايت ٢,٢٨. لذلك فإن الجاذبية النوعية لطوب السيليكا هي دليل جيد لدرجة التحول. لذلك فإن طوب السيليكا ذو جاذبية نوعية ٢,٤٥ من الواضح أنه يحتوي على كمية كبيرة من الكوارتز الذي لم يتم تحويله والذي يمكن أن يسببه النمو المستمر أثناء الاستخدام. الجاذبية النوعية لمعظم طوب السيليكا تقع ما بين ٢,٣٢ إلى ٢,٣٦ بما يبين تحول الكوارتز إلى الكريستوبالايت، التراي ديمايت.

حقيقة أن كثافة الماجنيزيا (magnesia) تزداد مع المعالجة الحرارية، استخدمت كطريقة لتقييم ملاءمة لهب الفرن لطوب الماجنيزيا. طوب الماجنيزيا الذي فيه بللورات الماجنيزيا (periclase) تم تنميتها تماما تمتلك على أقصى جاذبية ٣,٦٥. ولكن هذا الرقم لطوب الماجنيزيا مرتفع قليلا ويلزم تطويره طبقا للمكون الكيماوي للطوب المجنيز، المحتوى العالي من أكسيد الحديد ومن السيليكون يخفض القيمة الحقيقية.

الجاذبية النوعية للطوب الحراري ذات أهمية قليلة بسبب الطبيعة المعقدة للمادة.

تعيين الجاذبية النوعية الحقيقية:

واحد جرام من مسحوق مادة الحراري الجافة (رقم منخل أقل من ١٠٠) يتم وزنها في قنينة مقياس الثقل النوعي (pycnometer) التي تم معايرتها ووزنها. يتم ملء نصف الوعاء بماء عذب مقطر مغلي ووضعها لمدة نصف ساعة عند ٦٠ °م ثم تقليب المحتوى لبلل الحبيبات جيدا وإزالة الهواء المحتجز. القنينة يتم وضعها عندئذ في تفريغ مناسب لتأكيد هروب كل الهواء. يتم عندئذ ملء القنينة إلى العلامة بماء مقطر ووضعها في حمام درجة حرارة ثابتة لمدة ساعة. يتم تغطية القنينة، الأنبوب الشعري

وخــارج القنينة يتم مسحه لنظافته ثم يتم وزن الكل. الجاذبية النوعية يتم حسابها من المعادلة:

$$Sp.Gravity = \frac{W - P}{(W_1 - P) - (W_2 - W)}$$ (الجاذبية النوعية)

حيث:

P= وزن مقياس الثقل النوعي والسداده

W = وزن مقياس الثقل النوعي والسداده والعينة

W_1 = وزن مقياس الثقل النوعي والسدادة مملوءة بالماء.

W_2 = وزن مقياس الثقل النوعي والسدادة والعينة والماء.

يستفاد بمادة (tetrochlorocthane) بسبب لزوجتها المنخفضة وخاصية البلل العالية لأنه سيتم استبعاد خطوات الغلي وإزالة الهواء.

بعض البيانات عن الجاذبية النوعية والكثافة الكلية للحراريات في الجدول الآتي:

جدول:

نوع الطوب الحراري	الجاذبية النوعية الحقيقية	الكثافة الكلية جرام/ سم^٣
السيليكا	٢,٢ – ٢,٤	١,٧ – ١,٩
الطوب الحراري	٢,٦ – ٢,٧	١,٩ – ٢,١
البوكسايت	٣,١ – ٣,٤	١,٨ – ٢,١
الماجنيزيت	٣,٥ – ٣,٧	٢,٧ – ٣,٠
الكروم	٣,٧ – ٤,٢	٢,٨ – ٣,٥
الزركونيا	٤,٨ – ٥,٩	٤ – ٤,٦
الكربون	٢,٧ – ٣,١	١,٩ – ٢
السيليمانايت	٣,٠ – ٣,٢	٢,٠ – ٢,٢
السيليكون كاربيد	٣,١	٢,٢

النفاذية Permeability

تدفــق الغــاز خلال حائط الحراري يعتبر هام في كثير من الأفران، خاصة في حالة وجود اختلاف كبير في الضغط، كما في حالة أنواع التدوير. كذلك فإن النفاذية لبعض الأجــزاء مثل انابيب المزدوجة الحرارية (thermocouple) ، والأفران اللافحة (حيث الإحمــاء الخارجــي – muffles)، والمــسترجعات التي تسمح باستغلال حرارة الفرن المنصرفة (repucerators).

تــستخدم النفاذية لمراجعة التصنيع، حيث الفراغات، الرقارق والنقط اللينة تظهر في اختبار النفاذية. في حالة عازلات الحرارة تفيد هذه الصفة في إظهار الثقوب المتصلة داخليا.

مــسامية الطــوب الحراري لها علاقة قليلة مع النفاذية والتي هي قياس لمعدل تسرب وانتــشار الــسوائل والغازات خلال الحراري. النفاذية تحكم طبقا لحجم وعدد الثقوب المتــصلة/ القــنوات المتــصلة من جانب الحراري إلى الجانب الآخر. تزداد نفاذية الــسوائل مــع زيادة درجة الحرارة كما أن لزوجة السوائل تقل حيث الظروف عكس حالة الغازات التي تزداد لزوجتها عند درجات الحرارة العالية. نفاذية الحراريات هامة في بعض الاستخدامات مثل تبطين الفرن العالي حيث يمكن أن يحدث تحلل للحراريات نتــيجة الاحتــراق بواسطة أول أكسيد الكربون وما يلي ذلك من ترسيب ثاني أكسيد الكربون ($2CO=C+Co_2$) خلال الطوب.

قياس النفاذية:

الــنفاذية المطلقــة هي صفة الحراري، ولا تعتمد بأي طريقة على السائل. يعبر عنها بالآتي:

الــنفاذية المقاســة "K" (عــادة تقــاس بالهواء عند درجة حرارة الغرفة) ويعبر عنها بالمعادلة الآتية:

حجم الغاز × طول المسار   حيث ليس لها الأبعاد = المساحة

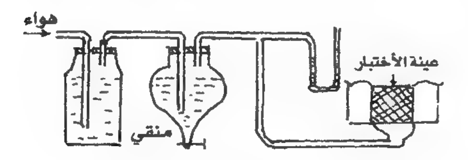
المساحة × الزمن × فرق الضغط   اللزوجة

ويعبر عنها سم^3/ سم. سم^2/ الثانية × سم^2 من الماء.

تعيين النفاذية:

النفاذية هي قياس للمعدل الذي يمر به سائل خلال مادة مسامية ويرمز لها بالحجم(سم^3) من الغاز أو الهواء الذي يمر خلال ١ سم^2. مكعب الحراري عند فرق في الضغط (جرام/ سم^2) في الدقيقة. الحراريات المعرضة للالتصاق المباشر بالغازات/ السوائل يجب أن تكون مانعة للنفاذية لمنع حدوث تسرب للغازات واختراق السوائل خلال الحوائط الحرارية للفرن.

في جهاز تعيين النفاذية الموضح في الشكل (٣/١٣) يتم تمرير الهواء النقي خلال عينة مكعبة للحراري ذات مساحة سطحية معلومة وسمك معلوم، ويتم تثبيتها في ماسك مع إحاطة بالزئبق (seal). حجم الهواء الماء في وحدة الزمن يتم تسجيله. الفرق في الضغط يتم قياسه بواسطة جهاز المانوميتر لقياس الضغط.



شكل (١٣) جهاز تعيين النفاذية

يتم حساب نفاذية عينة الحراري باستخدام المعادلة:

$$f = \frac{V\ .T}{A\ .T\ \Delta\ p}$$

حيث:

f = نفاذية عينة الحراري.

V = حجم الهواء المار خلال العينة سم٣

T = سمك العينة سم.

A = مساحة مقطع العينة سم٢.

t = الزمن الذي استغرقه الهواء في المرور خلال العينة بالدقائق.

Δp = فرق الضغط خلال السطحين للعينة جرام/ سم٢.

منع هروب الهواء على طول الجانب يعتبر مشكلة بالنسبة لقياس نفاذية العينة. معدات الاختبار تحتوي على العينة (مكعب، اسطوانة، أو طوب) في وعاء مطاطي قابل للنفخ. يستخدم الضغط الكافي للحام الأطراف تماما. يتم قياس حجم تدفق الغاز بواسطة عداد قياسي لقياس الغاز (أو بإزاحة الماء) بينما يتم قياس الفرق في الضغط باستخدام جهاز مقياس الضغط للغاز أو السائل (manometer). بالنسبة لنفاذية التدفق، فإن زمن الاختبار يجب أن يكون لفترة زمنية طويلة ما أمكن للحصول على نتائج دقيقة وجيدة.

الجدول الآتي بيان لقيم النفاذية لعدد من أنواع الطوب. القيم تم قياسها للتدفق على الثلاث محاور للطوب ولكن أعطيت هنا للتدفق مثنى الطرف (edgewise).

جدول:

نوع الطوب	متوسط المسامية %	متوسط النفاذية % f
عالي الألومينا –٦٠%	٢٨	٠,١١٧
الطفل الحراري فائق الأداء	١٩,٦	٠,١٨٣
الطفل الحراري عالي الأداء	١٩,١	٠,١٠١
الموليت (mullite)	٢٠,٨	٠,٠٣٢
الكروم مجنيزيا	١٥,٠	٠,٠٠٥
الماجنيزيت كروم	١٣,٥	٠,٠٠١
الماجنيزيت	٢٤,٢	٠,١٤٣
السيليكا، قياسي	٣٠,٣	٠,٤٦١

$$f = \frac{Cm^{3} \times Cm}{(SeC)(Cm^{2}(gm / Cm^{2})}$$

الـرقائق أو عدم الانتظام الانشائي يؤثر على قيم النفاذية. كل طوب الطفل الحراري بالضغط الجاف له نفس النفاذية ولكن طوب السيليكا له قيم أعلى.

الطـوب المـصنع بحجم أكبر من الكسر، أعلى ضغط للتشكيل وأعلى درجة حرارة حرق سيكون له نفاذية أقل إلى حد ما.

إجهاد الكسر على البارد (Cold Crushing Strength)

إجهـاد الكسر على البارد للحراري المحروق ليس له أهمية كبيرة ولكنه يعمل كدليل لخواص أخرى مثل التزجيج (vitrification) ، درجة حرارة الحرق، نقاء المادة. بالنسبة لطوب العزل، فإن الإجهاد يعين القدرة على تحمل التداول والتحميل.

اختـبار الكـسر على البارد يبين قدرة الطوب على تحمل مشاكل الانتقال ويمكن أن يستخدم كمؤشر مفيد لمناسبة الحرق والبري بالإضافة إلى خواص أخرى مثل النفاذية والكـثافة الكلية الخواص الميكانيكية (مثل إجهاد الكسر على البارد) للحراري التي يتم تعييـنها عـند درجـة حرارة الغرفة يجب أن تستخدم بحذر كدليل للسلوك المحتمل للحـراري عـند درجـات الحرارة العالية. نظرا لأن كل الطوب الحراري معرض لخـدمات حرق الحمل كمثل إجهاد الكسر على البارد فإنه من المهم اعتبار ما إذا كان الطوب الحراري يمكن استخدامه لعمل بطانة معينة من عدمه.

تعيين إجهاد الكسر على البارد:

يتم القياس في جهاز لختبار الضغط. حجم معين من الطوب بأبعاد (حوالي ٩ بوصة × ٤,٥ بوصـة) يـؤخذ إلى الجهاز الهيدروليكي، توضع هذه العينة بين المكبسين حيث التحرك بالضغط الهيدروليكي عند تشغيل الماكينة. مع نقطة تحمل الطوب للحمل فإن جهاز القياس للماكينة يعين الضغط الكلي بالطن، في كل دقيقة عند سقوط الطوب فإن المؤشـر يعود إلى الصفر للعينة تحت الاختبار. قيمة إجهاد الكسر على البارد تظهر مقـروءة على مقياس الضغط للماكينة. إجهاد الكسر على البارد للطوب الحراري يتم

باستخدام ماكينة اختبار قياسية ميكانيكية أو هيدروليكية. الحمل الذي يظهر عنده التشقق في عينة الاختبار يبين إجهاد الكسر على البارد للعينة. مساحة سطح التحميل يجب أن يساوي أو يزيد عن سطح عينة الاختبار. الحجم العادي لعينة الاختبار هو ٢٣٠ مليمتر مكعب للطوب القياسي عدا في حالة أشكال اخرى للحراري أصغر أو خاصة حيث تكون عينة الاختبار بحجم أصغر. كذلك يمكن استخدام عينة اختبار ٧٧ مليمتر مكعب. عينة الاختبار يتم وضعها بين ألواح من الأسبستوس الكثيف بسمك ٥ مليمتر عند تنفيذ الاختبار. اختبار إجهاد الكسر على البارد ذو أهمية خاصة في الأفران من نوع الفرن القائم والذي يشحن من أعلى ويفرغ من أسفل (shaft furnaces) حيث يكون حمل الشحنة مركزا بما يتطلب أن يكون الطوب قادرا على تحمل الحمل الآتي فوقه. الحراريات ذات الحبيبات الخشنة المسامية لها إجهاد كسر ضعيف، بينما الحراريات ذات الحبيبات الدقيقة لها إجهاد كسر جيد. إجهاد الكسر على البارد لبعض أنواع الطوب لمكونات معينة وذات نفاذية معينة موضح في الجدول الآتي:

نوع الطوب	المكون التقريبي %	المسامية الظاهرية %	إجهاد الكسر على البارد كجرام/ سم٢
الماجنيزيا	MgO-93.6	١٩,٧	٦٢٠
Foseterite	MgO-50.3 SiO_2-29.5	٢٢,١	٣٣٧
الكروم ماجنيزيت	Cr_2O_3-25.9 MgO-34.2	٢٢,٤	٢٧٥
الكروم	Cr_2O_3-29.7 Al_2O_3-34.1	١٥,٨	٩٩٢
٩٩% ألومينا	Al_2O_3-91.2 SiO_2-7.3	٢١,٣	٧٠٦
٧٠% ألومينا	Al_2O_3-69.2 SiO_2-24.8	٢٢,٩	٦٢٣
السيليكا عالية الأداء	SiO_2-95.8 Al_2O_3-0.2	١٩,٦	٣٤٠

نوع الطوب	المكون التقريبي %	المسامية الظاهرية %	إجهاد الكسر على البارد كجرام/سم^2
السيليكا التقليدية	SiO_2-95.8 Al_2O_3-0.5	٢٢,٥	٢٨٢
سيليكا فرن الكوك	SiO_2-94.9 Al_2O_3-1.0	٢٥,٦	٢٨٩
الطفل الحراري عالي الأداء	SiO_2-52.9 Al_2O_3-42.0	٩,٨	٨١٣
Stabilized zirconia كربيد السيليكون برباط من الطفلة	(ZrO_2+H_2O)-93.8 CaO-4.0	٢٣,٢	٤٠٩
Stabilized zirconia كربيد السيليكون برباد من الطفلة	SiC-89.2 SiO_2-7.3	٩	٦٤٢
طوب السيليكا الحراري للعزل	SiO_2-92.5 Al_2O_3-0.9	–	١٢

مقاومة التقشر Spalling Resistance

يعرف التقشر بأنه كسر في الطوب الحراري للأسباب الآتية:

- التدرج في درجة حرارة الطوب بسبب عدم تجانس التسخين أو التبريد الذي يحدث الإجهادات المسببة للتلف.
- الضغط في منشأ الحراريات بسبب تمدد الكل من ارتفاع درجة الحرارة مسببا تلف بفعل القص.
- التغير في معامل الحراري ما بين الطبقة السطحية لجسم الطوب بسبب الاختراق السطحي للخبث أو التغيرات البنائية في الخدمة الناتجة عن القص للطبقة السطحية.

النوع الأول يعتبر عموما أنه تقشر حقيقي و لكن هذا غير صحيح. إنه بلا شك التأثير الشائع في الحراريات مثل السيليكا والماجنزيزت والكروم، النوع الأول من التقشر يكون بسبب الخواص المرتبطة بالحراريات.

النوع الثاني للتقشر يرجع إلى التصميم الغير جيد للفرن والحراري نفسه.

الــنوع الــثالث من التقشر يمكن خفضه باستخدام طوب محروق عند درجات حرارة أعلى من درجة حرارة الاستخدام التالي وبمنع اختراق الخبث كلما أمكن ذلك.

الإجهاد الميكانيكي واللدونة لهم تأثير محكم على مقاومة التقشر. التقشر الحراري (كما يتم ملاحظته من التقشف الطبيعي والميكانيكي) يكون بسبب وجود إجهادات خلال جسم الطوب بسبب التغيرات في التدرج الحراري. حساب هذه الإجهادات ومقارنتها بأقصى قوة للمادة عند درجة الحرارة للاستخدام يؤدي إلى النتائج الآتية عند التسخين المفاجئ:

الاستعداد للتقشر = معامل التمدد

أقصى قص شد × الجذر التربيعي للانتشارية

$$\frac{\text{co.efficientO fExpansion}}{\text{max imum Shearing Strain} \times \sqrt{\text{diffusivit y}}}$$

عند التبيرد المفاجئ:

الاستعداد للتقشر = معامل التمدد

أقصى إجهاد شد × الجذر التربيعي للانتشارية

هذا يبين أنه لمقاومة التقشر، فإن الطوب يجب أن يكون له معامل تمدد منخفض، قوة عالــية، اســتعداد انتــشار حراري عالي. هذه المتطلبات تتوفر في كربيد السيليكون، السيليمانيت ومعظم الطوب الحراري. طوب السيليكون له مقاومة منخفضة للتقشر، أقل مــن ٦٠٠ °م، بسبب المعامل العالي للتمدد حتى درجة الحرارة هذه، أعلى من ٦٠٠ °٥، يــصير الــتمدد صــغيرا ومتجانس وتزداد مقاومة التقشر. طوب الماجنيزيت له اســتعداد عالي نسبيا للانتشارية بالقوة، ولكن له معامل تمدد عالي كذلك. لذلك، طوب الماجنيزيت يقع ما بين طوب السيليكا وطوب الطفل الحراري بالنسبة للمقاومة للصدمة الحرارية.

التقشر يحتمل حدوثه غالبا عند درجات الحرارة المنخفضة نسبيا. عند درجات الحرارة هــذه يكــون الــرباط زجاجي ولا يلين لإجهاد التمدد، مع ارتفاع درجة الحرارة فإن

الرباط يصبح متغير الشكل ويقبل بعض من الشد. التقشر يحدث أساسا أثناء التسخين والتبريد للفرن. يجب الحرص أثناء التسخين والتبريد لأي فرن مبطن بطوب السيليكا أو بطوب الماجنيزيت. طوب الدولوايت يجب عدم تعرضه لجو الفرن، حيث مع تلك المنتجات يحدث نوع معين من التقشر عند التعرض لدرجة الحرارة العالية. هذا ينطبق علـــى أفران من الحديد عند درجات الحرارة العالية، ولكن ليس لإعادة تسخين مجمرة الفرن.

في حالة الفرن المستخدم بطريقة متقطعة يمكن استخدام الطوب الحراري، السيليمانيت، كربيد السيليكون كلما أمكن لذلك، الاختيار الصحيح يتوقف على وجود أو عدم و جود الخبث وطبيعته وعلى التكاليف.

تعيين مقاومة التقشر:

مقاومة التقشر يتم تعيينها بطريقتين قياسيتين وهما:

١. اختبار اللوحة (panel)

٢. اختبار المنشور الصغير.

اختبار اللوحة لمقاومة التقشر:

فـــي هذا الاختبار يتم استخدام ١٢ إلى ١٤ قطعة اختبار من الحراري (بسمك ٦٥ – ٧٠ مليمتـــر، بطول ٢٣٠ مليمتر وبعرض ١١٣ مليمتر) بعد التجفيف (عند ١٥٠ °م) ووزن كل عينة بدقة يتم وضعهم في لوح الإطار بواسطة الكاولين أو أي مادة مناسبة (لهـــم نقطـــة انصهار لا تقل عن تلك لقطع الاختبار والتي لا تتفاعل معها).يتم ترقيم عيـــنات الاختـــبار بطلاء من السيراميك على السطح الداخلي الغير معرض للتسخين. ســـمك الاتـــصال لعيـــنات الاختبار في اللوح يجب أن يكون ≥ ٢ مليمتر. يتم دعمه وإســـناده بمادة عزل مناسبة لإمكان الفقد في الحرارة حوالي ٦٠٥ كيلو كالوري/ م٣/ الساعة في ظروف التشغيل ومتوسط درجة حرارتها يجب أن تكون حوالي ٧٠٠ °م. يـــتم عـــندئذ التـــسخين المـــسبق لتجهيزه الإطار واللوح (في فرن لهب غاز/ زيت) للمحافظـــة علـــى متوســـط درجـــة حرارة الوجه عند ١٦٠٠ °م لمدة ٢٤ ساعة. يتم

استمرار معدل التسخين للوصول إلى درجة حرارة ١٦٠٠ °م في ٤ – ٥ ساعة. بعد تمـــام التـــسخين المسبق، يتم تسجيل حالة عينات الاختبار مع أخذ صورة فوتوغرافية لسطح اللوح للتسجيل.

الألـــواح التي تم تسخينها المسبق بعد إزالة العزل يتم نقلها (بواسطة ترولي) إلى فرن آخـــر (الإشـــعال بالغـــاز/ الزيت) والذي يسمى فرن التقشر حيث يتم تسخين عينات الاختـــبار للوصول إلى درجة حرارة ١٤٠٠ °م في ثلاث ساعات. أثناء التسخين يتم تغييـــر مكـــان اللوح عند ١٠٠٠، ١٢٠٠، ١٣٠٠ °م لتأكيد تجانس التسخين. يستمر التـــسخين عند ١٤٠٠ °م لمدة عشرة دقائق ثم يتم بعدئذ تبريد اللوح في عشرة دقائق أخرى باستخدام تيار من ضباب خليط البخارو الماء بواسطة ماسورة رأسية ذات فتحة (٩٠ مليمتر × ٦٠٠ ملميمتر) يتم دخول الهواء بمعدل ٤٠ متر مكعب في الدقيقة بينما الماء يدخل بمعدل ١١ لتر خلال الدقائق الثمانية الأولى للبتريد. ولا يستخدم ماء أثناء الدقيقتين الأخيرتين.

وحدة التبريد لديها وسائل حركة التأرجح لتسهيل حركة الذهاب والعودة (١٢٥ مرة في ١٠ دقائق) فوق كل سطح اللوح. يتم تعريض عينات الاختبار إلى ١٢ مثل هذه الدورة للتسخين والتبريد ثم يتم إيقاف الفرن بعد ذلك. يتم تعريض اللوح إلى دورتين إضافيتين للتبـــريد بـــدون اســـتخدام أي ضباب ماء. التبريد التالي يسمح بحدوثه خلال ليلة بعد فواصل الألواح ٢٥ سم وجها لوجه. يتم عندئذ إزالة عينات اختبار الحراري من اللوح ثـــم يتم إعادة وزن كل منها. يتم عندئذ إعادة تنظيمهم بالترتيب الذي كانوا به في لوح الاختـــبار وتم تصويرهم للمقارنة ما بين الصورة الأولى التي توضع الحالة الأصلية للحـــراريات. يتم تسجيل متوسط الفقد في كل اللوح. درجة الفقد في الوزن للحراريات تعطي مؤشر لمقاومة التقشر للحراريات.

اختبار المنشور الصغير:

فـــي هذا الاختبار يتم قطع ثلاث قطع لختبار من الحراري من عينة الاختبار وطحنها

إلى أشكال المنشور بقاعدة مربعة ذات جانب ٥٠ مليمتر وارتفاع ٧٥ ملميتر في حالة الأشــكال القياســية و ٥٠ مليمتــر حلقــات عالية يتم قطعها من أشكال أخرى (مثل النافورات، أو الأكمام....الخ).

بعد تجفيف الثلاث عينات اختبار، يتم وضعهم في فرن لافح بارد أو فرن شبه لافح ثم يــتم التــسخين المنــتظم للوصول إلى ٤٥٠ °م في ثلاث ساعات في حالة حراريات السيليكا و ١٠٠٠ °م في ثلاث ساعات في حالة الطفل الحراري (fireclay)، حراريات الــسيليكية (siliceous) أو القاعدية. قطع الاختبار (التي تستمر عند درجة الحرارة هذه لمدة ٣٠ دقيقة) يتم إزالتها من الفرن (باستخدام زوج من الألسنة يتم تسخينها المسبق) ثم يتم تبريدهم لمدة ١٠ دقائق على أرض من الطوب في وضع خالي من الرياح. يتم اختبار عينات الاختبار بالنسبة لوجود شروخ، في حالة وجودها، يتم إعادتها في الفرن (والاســتمرار عــند درجــة حرارة الاختبار) لمدة عشرة دقائق ثم التبريد حتى زيادة الكسر في عينات الاختبار. الدورة التي يتم خلالها الظهور الأول للتشقق يتم ملاحظتها كذلك. عدد الدورات التي تتحملها عينة الاختبار قبل الكسر يتم أخذها كمقياس لمقاومة التقشر للحراري.

خواص التقشر لمختلف أنواع الطوب:

طوب السيليكا ليس جميعه مقاوم للتقشر في مجال درجة الحرارة المنخفضة. ولكن بعد درجــة حــرارة الــتحول، يكون شديد المقاومة لمجال كبير في درجة الحرارة بسبب استواء منحنى التمدد في هذا المجال.

جدول:

نوع الطوب	المقاومة للتقشر
الطفل الحراري عالي الأداء، المنتظم	مقبول
الطفل الحراري عالي الأداء، المقاوم للتقشر	جيد
فائق الأداء، منتظم	جيد جدا
شبه السيليكا semisilica	ممتاز
عالي الأداء	ممتاز – جيد
سيليكا	ضعيف أقل من ٦٥٠ °م وممتاز بعدها
كروم ماجنيزيا	متوسط إلى جيد
ماجنيزيت كروم	ممتاز
كربيد السيليكون	ممتاز
الكربون والجرافيت	ممتاز

طوب الكروم والماجنيزيت، بسبب معاملها العالي للتمدد الحراري، فإنها غير مقاومة للتقشر مثل طوب الطفل الحراري. طوب كربيد السيليكون له مقاومة ممتازة للتقشر. كما هو موضح في الجدول السابق.

التوصيل الحراري (Thermal Conductivity)

يعـــتمد التوصـــيل الحراري على المكونات المعدنية والكيميائية والمجال الزجاجي في الحراري ودرجة حرارة الاستخدام. رغم أن هذه الخاصية ذات أهمية متواضعة وذلك بالنسبة للكفاءة، إلا أنها هي التي تحدد سمك الطوب الحراري.

تتغيـــر خاصية التوصيل الحراري عادة مع ارتفاع درجة الحرارة، في الحالات حيث يكون التوصيل الحراري مطلوبا خلال بناء الطوب الحراري، كمثال، الأفران اللافحة (muffles)، المـــسترجعات (recuperators) . فـــإن الحراري يجب أن يكون له توصيل حـــراري عالـــي. التوصيل الحراري المنخفض يكون مطلوبا للمحافظة على الحرارة وذلك بتوفير العزل. بغرض توفير العزل الخلفي ، والمحافظة على الحرارة ولكن في نفـــس الوقت زيادة الوجه الساخن وبذلك فإن الطلب على نوعية الحراري تزداد. طبقا

لخــواص الحــراري المــستخدم في الوجه الساخن، مثل طاقة التحميل العالية لدرجة الحرارة المرتفعة، قد يكون مطلوبا أن نوعية الحراري تزداد مع زيادة الحرارة بسبب العــزل الــزائد. الحــراريات خفــيفة الــوزن ذات التوصيل الحراري المنخفض لها استخدامات كثيرة في أفران المعالجة الحرارية ذات درجة الحرارة المنخفضة إلى حد ما، حيث تكون وظيفتها الأولى هي المحافظة على الطاقة. وهو أكثر من ذلك في حالة الأفران ذات الأداء المرحلي (batch) حيث الطاقة الحرارية المنخفضة للمنشأ الحراري سوف تقلل من الاحتفاظ بالحرارة أثناء دورات التبريد والتسخين المتقطعة.

التوصــيل الحــراري لكــل من الطوب الحراري وطوب السيليكا يزداد بزيادة درجة الحرارة. القيمة المحددة لقدرتهم علىالتوصيل الحراري تتوقف على التركيب البنائي، درجــة الحــرق وعوامل أخرى. نظرا لأن معدل الزيادة في التوصيل الحراري مع درجــة الحرارة كثيرا لطوب السيليكا، فإن التوصيل الحراري لهذا النوع من الطوب عــند درجة الحرارة العالية يكون أكبر من ذلك للطوب الحراري (fire bricks). زيادة درجــة حــرارة اللهــب تــزيد التوصيل الحراري لكل من طوب السيليكا والطوب الحراري.

الطــوب الأكثر نفاذية، عموما له درجة توصيل حراري منخفضة، ولكن حجم وعدد المسام يعتبر هام كذلك حيث أن الانتقال الحراري يمكن أن يحدث عبر المسام بواسطة الإشعاع ويزداد عند درجة الحرارة العالية.

الحــراريات المستخدمة في أفران الصهر يجب أن يكون توصيلها الحراري منخفضا لتأكــيد أدنى فقد في الحرارة وزيادة كفاءتها حيث المسترجعات (recuperators) تحتاج حراري له انتقال حراري عالي لضمان أقصى انتقال حراري.

القيمة المتوسطة للتوصيل الحراري لبعض أنواع الطوب خلال مجال درجات الحرارة موضح في الجدول الآتي:

<u>جدول:</u>

نوع الطوب	التوصيل الحراري كيلو كالوري/ المتر في الساعة °م		
	١٠٠ °م	٥٠٠ °م	١٠٠٠ °م
الكورندم (الألومينا المنصهرة)	–	٣,٠١ ما بين ٦٥٠ – ١٢٥٠ °م	–
سيليمانيت	١,٣٦	١,٤٨	١,٤٨
طوب السيليكون كاربيد	–	–	٦,٨٨ ± ٨,٦١
طوب الكروم	١,٤٨ ± ٠,٣٧	١,٤٨ ± ٠,٣٧	١٤,٨ ± ٠,٣٧
طوب حراري	٠,٥٦ ± ٠,١٢	٠,٧٤ ± ٠,١٢	١ ± ٠,١٢
طوب الماجنيزيت	٥,٥٨ ± ٠,٦٢	٤,٤٦ ± ٠,٦٢	٣,٤٧ ± ٠,٦٢
طوب السيليكا	٠,٧٤	٠,٩٩	١,٢٤
طوب العزل	–	٠,٢٤	–

اختبار الكشط بالاحتكاك (A Brasion Test)

الحراريات المستخدمة في مجمرة الأفران أو في مكان آخر حيث المواد أو الأغراض تنـزلق خلالهـا (كما في حالة الفرن العالي) يجب أن تكون ذات مقاومة جيدة للكشط والاحـتكاك. كذلك فإن الحراريات يحدث لها تلف بفعل الحبيبات في الغازات سريعة التحـرك. اختـبار الكشط بالاحتكاك عند درجة حرارة الغرفة لا يحقق أي بيان عن سلوكها عند درجة حرارة التشغيل العالية.

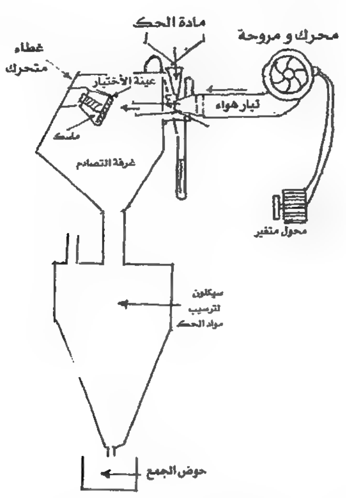
فـي أحد اختبارات الاحتكاك والكشط، يتم الحك لعينات الحراري معا داخل الفرن ثم تعيـين الفقـد فـي الوزن لفترة زمنية معينة من الاختبار. نموذج للنتائج موضح في الجدول الآتي:

<u>جدول:</u>

درجة حرارة الاختبار °م	الفقد في الوزن بالجرام
٢٠	٠,١١٥
١٠٥٠	٠,٢٥٥

يتضح أن مقاومة الكشط للاحتكاك تقل مع ارتفاع درجة الحرارة. البناء الدقيق للحبيبات ودرجة حرارة الحرق العالية يزيد من مقاومة البري بالاحتكاك. الطوب الذي له مقاومة جيدة للأحمال سوف يقاوم كذلك البري بالاحتكاك. مقاومة البرك بالاحتكاك لطوب العزل الحراري أقل عن تلك للحراريات الثقيلة. اختبار البري بالاحتكاك يتم لذلك بتدوير الحبيبات الصغيرة بواسطة الهواء عالي السرعة خلال ماسورة مبطنة بطوب معين.

رغم أنه توجد أعداد من طرق الاختبار، إلا أن طريقة (BS) لمؤشر مورجان – مارشال للبري يعتبر هام كما هو موضح في الجهاز المستخدم لهذه التجربة شكل (١٤/٣) الظواهر الهامة لهذا الاختبار هو زاوية التصادم لرمل الحك والبري (الألومينا المنصهرة أو مادة متشابهة) على عينة الاختبار، والتي هي ٤٥ °م، الصلابة، الحجم (عادة رقم منخل – ١٠ + ٢٥ رقم منخل طبقا لـ BS)، وكمية الرمال، وكذلك طبيعة كتلة الكربون التي يتم بها مقارنة عينة الاختبار. كل هذه المعايير في طريقة المواصفات الإنجليزية (BS)، إلا أن النتيجة التي يتم الحصول عليها هي فقط قيمة مقارنة.



شكل (١٤) مخطط لاختبار مؤشر الثبات لمارشال - مورجان

المقاومة الكهربية/ التوصيل الكهربي

في الأفران الكهربية، تكون المقاومة الكهربية للحراريات ذات أهمية كبيرة، بينما في كثير من الحالات الأخرى، يكون المطلوب العزل الكهربي عند درجات الحرارة العالية.

الجرافيت والمعادن موصلات كهربية جيدة وخلاف ذلك. فكل الحراريات عازل كهربي. الطوب الحراري لتبطين الأفران الكهربية يجب أن يكون له توصيل كهربي ضعيف جدا. الجرافيت (وهو مادة حرارية موصلة للكهرباء) يستخدم كأقطاب إما في الشكل المعد ذلك أو تبطين للأفران الكهربية ذات درجة الحرارة العالية. الحراريات

المسامية لها توصيل كهربي ضعيف.

مقياس المقاومة عند درجات الحرارة العالية تصاحبها صعوبة خفض مقاومة الالتصاق.

المقاومة الكهربية لبعض الحراريات التجارية موضحة في الجدول الآتي:

جدول:

نوع الطوب	المسامية %	المقاومة الكهربية عند درجات الحرارة المختلفة أوم/ سم		
		٨٠٠ °م	١٢٠٠ °م	١٤٠٠ °م
طوب حراري عالية الأداء	١٨	١٩٠٠٠	١٥٥٠	٧٢٠
عالي الألومينا (٧٠%)	٢٣	١١٨٠٠	٩٠٠	٤٦٠
المولايت	٢٦	٢١٠٠٠٠	١٦٠٠٠	٧٢٠٠
المولين المنصهر المسبوك	١٥	٢٥٠٠٠	١٧٠٠٠	٧٦٠
السيليكا عالي الأداء ٩٧%	٢٦	٣٦٠٠٠٠	١٠٥٠٠٠	٣٣٠٠
السيليكا ٩٠% SiO_2	٢٢	١٥٠٠٠٠	٤٣٠٠٠	١٦٥٠
الكروم ماجنيزيت	١٤	١٤٥٠٠٠٠	١١٥٠٠	٦٨٠
الماجنيزيت كروم	٢٩	٣٧٠٠٠٠	٢١٠٠٠	٣٦٠٠
الزركونيا	–	–	١٢٥٠	٣٠٠
الكربون	–	٠,٠٠٣	٠,٠٠٣	–
الجرافيت	–	٠,٠٠٠٧	٠,٠٠٠٨	٠,٠٠٠٩

عند درجة الحرارة المنخفضة يكون التوصيل منخفض جدا للحراري. مع ارتفاع درجة الحرارة يزداد التوصيل بسرعة حتى الوصول إلى نقطة الانصهار حيث يحدث التوصيل الإليكتروليتي. في حالة المعادن النقية يكون التوصيل منخفض حتى نقطة الانصهار. ولكن في حالة الحراريات المتوسطة فإنه تتكون مجالات سائلة بفعل الملوثات عند درجات حرارة منخفضة نسبيا حيث يحدث انهيار مبكر للمقاومة.

عموما، المادة النقية ذات درجة حرارة انصهار مرتفعة توفر أفضل مقاومة كهربية

عند درجة الحرارة العالية.

مقاومة الحراريات للأبخرة والغازات والخبث:

تحـدث العدوانية على الحراريات بفعل المحلول الكيماوي للطوب، زائد البري الناتج عـن حـركة السوائل، والتقشر، الذي يلي التغيرات في درجة الحرارة. المواد البالغة الحـد الأدنى من الانخفاض وهي المواد الأصهورية (eutectics) تتكون تفاعل حامض – قلوي أو بفعل مواد الإضافة لخفض درجة حرارة الانصهار (fluxes). الأصهور هو مركب من مادتين أو أكثرتنصهر عند درجة حرارة أقل من أي من مكونات الخليط.
رماد الفحم (coal ash) هو الحالة العادية المسببة للعدوانية على الحراريات بفعل حدوث الخبث. فهي تحتوي على SiO_2 ، Al_2O_3 ، Fe_2O_3 ، FeO ، CaO ، MgO ، Na_2O ، FeS_2 ، FeS . مـن هذه CaO ، Na_2O ، FeO ، FeS_2 و FeS المسبب لأكبر درجة من العدوانية الكيماوية بإحداث الخبث (slagging).
في حالات ظروف الاختزال يتكون كلا من أكسيد الحديدوز، سلفيد الحديدوز والحديد. هذه تخفض نقطة الانصهار لحوائط الحراري وتذيب الطبقات الخارجية.
كثيرا من الغازات والأبخرة الموجودة في جو الفرن لها تأثير مدمر على بناء الطوب الحـراري. تحلـل أول أكـسيد الكربون $C + CO_2 \rightarrow 2CO$ حتى عند درجات الحرارة المنخفضة (من ٤٥٠ – ٥٥٠ °م) والذي يساعد على حدوثه وجود أكسيد الحديد الحر ينـتج عـنه ترسيب الكربون عند وصلات الطوب ويذا يحدث إرباك للبناء الإنشائي للطوب. مثل هذا الطوب الذي يصبح رمادي يحدث له تشقق كما يسهل تفتيته. تخفيف أول أكـسيد الكـربون بثاني أكسيد الكربون (كما هو الحال في الغازات العادمة) يقلل بـشدة اسـتعداد التفتيت للطوب. بخار الماء له تأثير مدمر على الحراريات القاعدية ويقلـل من درجة حرارة الانصهار للطوب الحراري وطوب السيليكا. الأبخرة القلوية في الغازات تخترق البناء الطوبي وتتفاعل مكونة مركبات ذات درجة حرارة انصهار منخفضة.

المقاومة لعدوانية أول أكسيد الكربون:

بالنسبة لهذا الاختبار يتم قطع عينتين من الحراري. يتم قطع أحدهما من مركز الحراري بينما العينة الاخرى يتم قطعها من الخارج لشكل حراري آخر. عينات الاختبار عادة تكون اسطوانية (بطول ٥٠ ملميمتر والقطر لا يقل عن ٣٠ ملميتر)، ولكن يمكن قطعها كذلك في شكل مستطيل أو في شكل منشور.

لتعيين المقاومة لعدوانية أول أكسيد الكربون على الحراري، يتم وضع عينتين الاختبار في فرن ملفوف بسلك ذو حجم مناسب الذي يتم تطهيره بالنيتروجين النقي. يتم عندئذ تسخين الفرن إلى ٤٥٠ °م ثم أول أكسيد الكربون النقي (الذي ينتج بتفاعل CO_2 مع الفحم Char coal عند ١٠٠٠ °م أو أن يتم توليده من حامض الفورميك وحامض الكبريتيك) يتم تمريره خلال الفرن بمعدل ٢ لتر في الساعة. يستمر الاختبار لمدة ١٠٠ ساعة أو حتى تتلاشى عينات الاختبار. إذا ظهر ذلك مبكرا. يتم ملاحظة عينات الاختبار بانتظام بالنسبة لتغير اللون، ترسيب الكربون والتفكك الذي يحدث أثناء فترة الاختبار مع تسجيل هذه الملاحظات للعينتين. تستمر درجة الحرارة (٤٥٠– ٥٠٠ °م) ومعدلات التدفق لأول أكسيد الكربون ثابتة خلال الاختبار. الوقت الذي بعده يحدث ترسيب للكربون أو التفكك يؤخذ كمقياس لمقاومة الحراري لعدوانية أول أكسيد الكربون. تأثير التفكك بفعل أول أكسيد الكربون يتوقف تحديدا على وجود أكاسيد الحديديك في الحراريات.

أول أكسيد الكربون والنيتروجين المستخدم في هذا الاختبار يتم تنقية كل منها (لإزالة ثاني أكسيد الكربون، الأكسجين، وبخار الماء) قبل الاستخدام ويتم قياس معدل التدفق لأول أكسيد الكربون باستخدام جهاز قياس الضغط (manometer) وجهاز قياس التدفق (flow meter) في خط الغاز قبل دخوله إلى الفرن.

قياس مقاومة الخبث (Slag Resistance)

اختبار الخبث يقيم مقاومة الحراري لاختراق الخبث. طرق الاختبار تقيس اختراق الخبث في الحراري، نقطة الانصهار لمسحوق الخبث والحراري عند خلطهما معا ثم

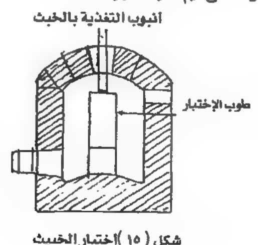
دراســة وصــفية للخلــيط (petrographic study) من الخبث والحراري مع المعالجات الحرارية.

إجراء اختبار الخبث:

اختبار الخبث يتكون من تسخين طوبة واحدة أو عامود من الطوب إلى درجة حرارة متجانــسة ثم إسقاط بودرة الخبث بانتظام من أعلى ويسمح لها للتحرك إلى أسفل في أخــددون كمـــا هو موضح في الشكل (١٥). العمق الذي تم به قطع هذا الأخدود عند نهاية الاختبار يعطي بيان جيد عن مقاومة الطوب للخبث، لأن الاختبار يتم في ظروف قريبة من ظروف الخدمة. رغم أن هذا الاختبار يعطي قيم ممتازة نسبيا، إلا أنه ليس اختبار كمي ولا يحافظ على استمرار التدرج في درجة الحرارة من سطح الخبث إلى السطح الآخر.

اختبارات رش الخبث Spray Slag Tests

اختبار آخر أكثر أهمية يتكون من رش مسحوق الخبث على الحراري الساخن. هنا يتم تغذية الخبث المسحوق خلال موقد دوار يصطدم على طوب الاختبار الموضوع داخل فــرن أسطواني. لذلك، فإن كل الطوب يحصل على نفس المعالجة والتدرج في درجة الحــرارة خلال الطوب تشبه لتلك الموجودة في الخدمة. في حالة عمل الاختبار لعدة أيام، يمكن الحصول على قيم كمية حقيقية.



شكل (١٥) اختبار الخبيث



التفاعل بين الحراريات الملتصقة:

من المرغوب فيه معرفة أقصى درجة حرارة آمنة التي عندها يمكن تسخين الحراري عند وضعه على حراري آخر. الجدول الآتي يوفر بعض البيانات بالنسبة للحراريات التجارية.

<u>جدول لبيان أقصى درجة حرارة °م التي عندها يلتصق حراريين بدون تفاعل:</u>

نوع الطوب	كـــروم ماجنيزيت	كروم	%٩٠ ألومينا	%٧٠ ألومينا	طفل حراري عالي الأداء	كـربيد السيليكون برباط من الطفلة	سيليكا	زركون
ماجنيزيت	١٧٠٥	١٦٥٠	١٧٠٥	١٠٩٥	١٣١٥	١٤٨٥	١٤٨٥	–
كروم	–	١٧٠٥	١٠٩٥	١٤٨٥	١٤٩٥	١٤٨٥	١٤٨٥	١٤٨٥
مجانيزيت كروم	–	–	٢٠٩٥	١٤٨٥	١٤٨٥	١٤٨٥	١٠٩٥	–
%٩٠ ألومينا	–	–	–	–	–	–	١٠٩٥	١٤٨٥
طفل حراري عالي الأداء	–	–	–	–	–	١٠٩٥	–	–
كربيد السيليكون برباط من الطفلة	–	–	–	–	–	١٠٩٥	١٠٩٥	١٦٥٠
ألومينا %٧٠	–	–	–	–	–	–	١٠٩٥	–



نوع الطوب	كـــــروم ماجنيزيت	كروم	٩٠% ألومينا	٧٠% ألومينا	طفل حراري عالي الأداء	كـربيد السيليكون برباط من الطلفة	سيليكا	زركون
سيليكا	–	–	–	–	–	–	–	١٦٥٠
زركون							–	–

اختيار معامل التلف Modulus of Rupture Test

تلف الطوب عمليا نادرا ما يأخذ شكل التهشم البارد. عموما استخدام عزوم الإنحناء حيث يتلف الطوب بالكسر إلى جزئين وليس بالتفتت. في اختبار معامل التلف (والذي يتم تنفيذه على ماكينة ضغط ميكانيكي أو هيدروليكي قياسية)، فإن عينة الاختبار (ذات أبعاد ٢٢ × ١١,٣ × ٦,٥ سم المقطوعة من الشكل المطلوب للحراري) يتم وضعها على أطراف التحميل للماكينة بفاصل ١٨ سم. يتم عندئذ استخدام حمل ثابت (بمعدل ١٠ كجرام في الدقيقة في حالة الماكينة الهيدروليكية) و ١,٢٥ كجرام في الدقيقة عند استخدام الضغط الميكانيكي عند منتصف العينة مع تسجيل الحمل الذي يحدث عنده تلف للعينة. في حالة عدم وجود ماكينات هيدروليكية أو ميكاينيكة فإن استخدام التحميل يجب أن يكون متجانس بدون اهتزازات.

معامل التلف (R) بالكيلوجرام/ سم² طبقا للمعادلة :

$$R = \frac{2WL}{2bd\ 2}$$

حيث:

W = الحمل الكلي الذي حدث عنده كسر للعينة (كيلوجرام)

L = المسافة بين الأطراف الحاملة (سم)

b = عرض العينة (سم)

d = سمك العينة (سم)

في نفس ماكينة اختبار الضغط المستخدمة في تعيين إجهاد الكسر على البارد، مع قليل من التعديل، يمكن عمل اختبار معامل التلف.

الفصل الثالث

3

الحراريات العازلة
Insulating Refractories

الحـــراريات العازلـــة توضـــع في الفرن لخفض الفقد في الحرارة وبذا تعظيم ترشيد الطاقـــة. هذه الحراريات لها نفاذية عالية وتوصيل حراري منخفض. يستخدم الصوف الزجاجي وصوف الخبث (slag wool) كمادة عزل لدرجة الحرارة المنخفضة. شعيرات السيراميك، و صوف أو رغاوي السيراميك (foam ceramic) يستخدم في عزل درجات الحرارة العالية. الحراريات الأخرى للعزل الحراري يتم إنتاجها من الطفل الحراري، أو الأسبستوس.

استخدام حراريات العزل في الفرن تسهل:

- أقصى محافظة على الحرارة.
- خفض الفقد الحراري.
- أقصى كفاءة حرارية.
- أدنى استهلاك للوقود.
- درجة حرارة تشغيل عالية.
- ظروف تشغيل أفضل للعمالة.

- تقليل مشاكل تداول الوقود.

الصفات المطلوبة في حراري العزل الجيد هي:

- المسامية العالية المتجانسة.
- التوصيل الحراري الضعيف.
- اختبار الكسر على البارد جيد بدرجة مناسبة.
- قيم عالية لمعادل القمع الحراري (PCE) لتحمل درجة حرارة التشغيل.

المنشأ عالي المسامية حيث الهواء الذي يحتجز عندئذ يقلل ذلك من طاقة التوصيل للحراريات ويزيد من خواص العزل لها ذلك لأن الهواء المحتجز عازل جيد. مواد العزل المستخدمة كمادة تقوية في الفرن تمنع التوصيل الحراري من منطقة التسخين خلال الحوائط الجانبية أو القاع بدون الحاجة إلى زيادة ضخامة إنشاءات الفرن. التوزيع المتجانس لفراغات المسام يؤكد أفضل خصائص العزل الحراري. يتم تطوير خصائص العزل بضبط النسبة ما بين حجم وعدد الحبيبات الصلبة وفراغات المسام وكذلك اختيار مواد أقل قدرة على التوصيل الحراري. لإدخال المسامية في حراريات العزل يتم وضع بعض من المواد الكربونية مثل نشارة الخشب في خليط الحراري والتي تحترق باللهب تاركة مساحات مسامية في المنتج الحراري. المسامية يمكن كذلك إدخالها بإضافة مادة متطايرة مثل مسحوق النفثالين أو كيماويات مثل فوسفات الكالسيوم، كلوريد الأمونيوم أو كبريتات الأمونيوم....الخ. استخدام رقائق الخشب الصلب ينتج عنه كذلك زيادة حجم المسام.

إنتاج الطوب الحراري ومواد العزل الأخرى يتطلب معالجة مختلفة. يقسم طوب العزل إلى قسمين – أحدهما للاستخدام عند درجات الحرارة المنخفضة أي أقل من ١٠٠٠ ° م. مواد العزل الأخرى هي شعيرات السيراميك ذات المكونات المختلفة للاستخدام في درجات الحرارة المختلفة.

طوب العزل للحرارة المنخفضة يصنع من حبيبات تقشر الزخارف الدودية (exfoliated vermiculite)، قشور الميكا أو الدياتوب (وهذا طين صفحي من طحلب مجهري أحداي

الخلـــية وجدرانه مشبعة بالسيليكا – diatomite). عند استخدام أي من تلك المواد الخام التـــي تـــم ذكرها، فإنه تستخدم كمية جيدة من الحبيبات الكربونية في مكونات الشحنة والتـــي تحتـــرق أثـــناء الحـــرق، تاركة فراغات داخل بناء الطوبة، والتي تساهم في خواصـــها في العزل. حبيبات تقشر الزخارف الدودية يمكن أن تستخدم لعمل الطوب والكتل بدون حرق وذلك باستخدام أسمنت هيدروليكي الشك في إنتاجها.

طوب العزل في درجات الحرارة المرتفعة ينتج من خليط من حبيبات الطفل المحمص أو الكيانيت (kyanite) المحمص أو الكيانيت الخام معا مع مواد كربونية قابلة للاحتراق في الشحنة. استخدام مادة قابلة للاحتراق يمكن تجنبه بتبني تقنية الرغاوي أثناء تشكيل الأشـــكال. حاليا يتم إنتاج حبيبات فقاعة الألومينا فقاعة السيليكا لعمل كلا من منتجات العـــزل الحراري المقولبة أو الغير مقولبة، للاستخدامات عند درجات الحرارة العالية.

قشر الأرز يعتبر مادة عزل هامة ومناسبة لدرجات الحرارة حتى ١٥٠٠ °م.

يـــستخدم جـــزء صـــغير من الطفلة اللدنة كرباط في طوب العزل لدرجات الحرارة المنخفضة والمرتفعة. يتم تشكيل الطوب عند ضغط منخفض أو حتى بالتشكيل اليدوي.

يتم حرق طوب العزل الحراري عند درجة حرارة طبقا للمادة الخام المستخدمة وكذلك درجة حرارة استخداماتها. ولكن درجة حرارة الحرق يفضل أن تكون أعلى من درجة حرارة استخداماتها.

يـــتم وضـــع حـــراريات العزل بواسطة المواد الأسمنتية العازلة من مكونات مشابهة لحراريات العزل نفسها مع التأكيد على أن تكون الوصلات رقيقة جدا.

الطفل الحراري من النوع (الدرجة) المناسبة هو الأكثر استخداما كمادة عزل والتي يتم تجهيـــزها بخلط الطفل الحراري مع نشارة الخشب (المادة القابلة للاحتراق المستخدمة لتكوين المسام) ومادة ربط يليه تشكيل الخليط طبقا للأشكال المطلوبة (باليد، أو البثق أو بالـــضغط الجـــاف)، والتجفيف والحرق (عند درجة حرارة ١٠٠ °م أقل من قيمة مكافـــئ القمـــع الحراري للطفل الحراري المستخدم). الغازات العادمة المنتجة نتيجة احتراق نشارة الخشب التي يتم طردها من الطوب الحراري ينتج عنها منتج خفيف له

البناء المسامي المطلوب. طوب العزل الحراري المنتج من الطفل الصيني (chinaclay) له قدرة مقاومة حرارية أعلى بينما المنتج من الأسبستوس رغم قلة توصيله الحراري إلا أن مقاومته الحرارية أقل مقارنة بطوب الطفل الحراري. الطفل الحراري يستخدم حتى ١٥٠٠ °م بينما يستخدم الأسبستوس حتى ٩٠٠ °م. التمدد عند التسخين يقلل من الكثافة (بحوالي ١٦%) وتفتت المادة بسبب التغير البنائي عند التمدد يتم تجنبه باستخدام مادة قابلة للاحتراق (مثل نشارة الخشب) والتي تحترق تاركة فراغات مسامية في المنتج. لعزل الأحماض الحامضية، يستخدم خليط من الطفل الحراري والكوارتز ونشارة الخشب لعمل العزل الحراري. حراريات العزل لكونها عالية المسامية وذات قوة منخفضة نسبيا تتطلب العناية عند التداول والتعبئة في الفرن والحرق لتجنب تفتتها.

الأنورثايت (anorthite) هي مادة حرارية صناعية خفيفة الوزن تصنع من الكاولين (الصلصال الأبيض) والجبس (بالصهر والصب) له خواص عزل حراري عالية، وله قوة عالية وكثافة ظاهرية منخفضة (٠,٥ جرام/ سم^{٣}) ومناسب للاستخدام عند ١١٠٠ °م إلى ١٢٥٠ °م. وهذه تستخدم تحديدا في الوسط المختزل المحتوي على الكربون.

المواد الصناعية عالية القوة (ذات المسامية المفتوحة حتى ٨٥%) يمكن إنتاجها بإضافة (PVC, Polystyrene, Polythene)....الخ. (أي مركبات مصنعة ذات وزن جزيئي عالي).

الصوف الزجاجي، الأسبستوس، رماد الخشب (slag wood) (في شكل شعيرة الصوف).....الخ في العزل حيث درجة الحرارة المنخفضة. يستخدم مسحوق الزركونيا ومسحوق الألومينيوم تستخدم لمنع الأفران المعملية. حيث الحشو المفكك للمسحوق ينتج عنه منشأ مسامي. المسحوق متجانس الأحجام يؤكد التوزيع المتساوي للماسحة الفراغية وبذا تحسن خواص العزل. مدخل الرأس العلوي لقالب الصب الذي يحوي مخزنا من المادة المنصهرة (hot top-insert) ذات كثافة من ٠,٨٥ – ١,٥ جرام/ سم^{٣} الذي ينتج من خليط حراري يحتوي على ٦٤ – ٨٠% من أكسيد

السيليكون، ٢ – ٢٠% كل من اللجنين ونشارة الخشب يستخدم كعازل حراري لمدخل قالـب الـصب (أي القمة الساخنة) لكتل الصلب الخام وذلك للعزل الحراري الجانبي للصلب في الجزء المرتفع للقالب والذي يقلل الفاقد بالتخلص من الجزء العلوي.

تـستخدم الحـراريات ذات القوة والمسامية الكافية في مراجعات (checkers) الأفران الاسـترجاعية (regenerative furnaces) والتـي تـساعد فـي انتقال حراري أفضل واسترجاع أفضل. الغازات الساخنة التي تمر خلال المسام ترفع درجة حرارة حبيبات العـازل الحـراري وهـذه الحرارة يتم استعادتها عند مرور تيار الهواء البارد خلال المراجعات في دورة اللفح (blast). كلما كان توزيع المسام متجانسا، كلما كانت كفاءة الحرارة المنتجة لهذه الحراريات أفضل.

الألـواح ذات المحـتوى العالي من صوف الألومينا تستخدم كمادة عزل في الأفران المستخدمة في عمليات طبع البيانات على الصلب، وفي وحدات الصهر والسبك لإنتاج سبائك الألومينيوم وفي الأفران المستخدمة في تجانس منتجات الألومينيوم شبه النهائية. ولهـا قوة عزل حرارية عالية (أكبر من ١٧٥٠ °م)، وتوصيل حراري منخفض (أقل مـن ٢٩ وات/ المتر عند ٨٠٠ °م) ويمكن استخدامها بأمان عند درجة حرارة تشغيل حتـى ١١٥٠ °م. ولكن هذه المادة لها عيوب فقد الكهرباء أثناء التسخين ويحدث لها تغير في شكل الحبيبات بعد النقع لمدة طويلة عند ≤ ١٠٠٠ °م. هذا بالإضافة إلى أن انخفاض لدونتها يمنع استخدام القرميد للأجزاء ذات الانحناءات الكبيرة. هذه السلبيات لألـواح العزل يتم التغلب عليها باستبدالها بشعيرات العزل (مثل شعيرات السيراميك) ومن حصائر اللباد.

شعيرة السيراميك (Ciramic Fibre)

تنـتج شعيرة السيراميك من مواد مختلفة منصهرة مثل الألومينا، السيليكا، الزركونيا، التيتانـيا، الثوريا (thoria)، أكسيد التانتالام (tantalum oxide)....الخ في شكل صوف، شعيرات قصيرة وشعيرات طويلة. يتم عندئذ تشكيل قماش الجوخ (cloths) والبطاطين

مـــن هـــذه الشعيرات بمختلف الطول والعرض. بالمثل الورق واللباد يصنع كذلك من الـــصوف لاســـتخدامه كمـــادة عزل حرارية. لكونه خفيف جدا وعالي المسامية، فإن شعيرات السيراميك لها كفاءة عزل ممتازة لعزل درجات الحرارة العالية بالإضافة إلى ميـــزة الخفض استهلاك مواد العزل بحوالي ٤٠ – ٦٠%. بخلاف الخفض في الوزن الكلـــي للمنشأ، فإن تبطين الفرن بشعيرات السيراميك يقلل من استهلاك الوقود بشكل ملاحظ ويزيد من إنتاجيته. شعيرة طفل الصلصال (الكاولين) تحديدا تعتبر مادة شديدة التأثير كعازل حراري.

يصنع كثيرا من أنواع اللباد المصنع من شعيرة السيراميك بطريقة الدرفلة (الدحرجة) والـــدمج للشعيرات المنتجة بصهر الألومينا والرمل في فرن كهربي وتشت المصهور إلـــى شـــعيرة بـــنفخها بواسطة البخار الحامل للكمية الضرورية من مادة الربط (مثل الـــسيليكون) لتحـــتويه الشعيرة لزيادة القوة. اللباد المدمج يتم قطعه بواسطة اسطوانة ســـكاكين ويـــشكل فـــي رولات (لفـــات) للاســـتخدام النهائـــي. اللـــباد من شعيرة الألومينوسيليكيت (كثافة ٠,٠٤٨ إلى ٠,١٢٨ جرام/ سم٣) تستخدم كطبقة عاملة لتبطين الأفران الصناعية عند درجة حرارة الخدمة ما بين ٨٠٠ – ٨٥٠ °م وسرعة صعود الغاز العادم ٩ متر في الثانية. بالمثل فإن اللباد العازل عالي الألومينا برباط السيليكون يمكن أن يتحمل درجة حرارة حتى ١١٥٠ °م حتى مع الاستخدام الطويل ويمكن أن يعمـــل كطـــبقة عاملـــة لتبطين الأفران الصناعية عند درجة حرارة الخدمة ٨٥٠ °م وسرعة الغاز العادم حتى ٥ متر في الثانية.

شـــعيرة السيراميك زاد استخدامها في أعمال العزل للمحركات النفاثة وأفران الصلب للعـــزل الحـــراري بـــسبب قـــدرتها الفائقة على العزل وبساطة الاستخدام، التخزين المـــنخفض للحـــرارة، وخفـــة الوزن، وانخفاض التوصيل الحراري. هذه مواد عزل اقتـــصادية وذات كفاءة للأفران حيث لا يوجد ا لتصاق مباشر مع المعدن المنصهر. مواصفات شعيرة السيراميك من نوعين موضحة في الجدول الآتي:

<u>جدول:</u>

المعايير	درجة (١)	درجة (٢)
المكونات $Al_2O_3\%$	٤٣ – ٤٧	٤٦ – ٤٨
$SiO_2\%$	٥٣ – ٥٧	٤٧ – ٤٩
$Fe_2O_3\%$	٠,٠٢ – ٠,٠٨	٠,٧ – ١,٢
$TiO_2\%$	٠,٠٢ – ٠,٠٥	١,٥ – ١,٩
الخواص الكثافة الكلية جرام/ سم^3	٠,١٢٨	٠,١٢٨
قطر الشعيرة ميكرومتر	٢ – ٣	٣
نقطة الانصهار °م	١٧٦٠	١٧٦٠
درجة حرارة الاستخدام الآمنة	١٢٦٠	١٢٦٠
الطاقة الحرارية عند ٩٨٠ °م، كيلو كالوري/ كجرام	١,٠٧	–
إجهاد الشد (MP's)	١٤٠٠	٩٦٠

معظم الشعيرات المستخدمة في أعمال العزل هي سيليكات الألومينيوم المنفوخة التي هي بيضاء زجاجية وغير بللورية. عملية إنتاج الشعيرات تختلف من منتج إلى آخر ولكن تتكون عموما من صب تدفق مصهور سيليكات الألومينيوم الزجاجية عند ٢٣٠٠ °م إلى مغزل دوار أو أمام تدفق عالي الضغط من الهواء أو البخار. كلا التقنيتين تكسر التدفق إلى نقاط وتوفر عجلة عالية في هذه النقاط مسببة لهم تلطيف الشعيرات.

خواص وصفات الشعيرات:

قطر الشعيرة: متوسط قطر الشعيرة يتراوح ما بين ٢,٢ و ٣,٣ ميكرون يعطي توصيل حراري منخفض عند كثافة قليلة ومتوسط حرارة مرفع ولكن تأثيرها عند كثافة أعلى يكون قريبا من الحد الأدنى.

الخواص الحرارية:

شعيرات السيراميك لها توصيل حراري منخفض جدا والذي يقل مع زيادة الكثافة الحجمية (الكثافة الظاهرية للمسحوق السايب) للشعيرات ويزداد مع زيادة درجة

الحرارة بسبب نسبتها العالية من الهواء (٩٠%). التوصيل الحراري يكون مفضل في اتجاه الشعيرة لنسيج الشعيرة ويكون حوالي ٣٠% أعلى من الاتجاه العمودي. إشعاع كتلة الشعيرات، يمنع التيارات الموصلة، لذلك يظل يسمح فقط بكمية صغيرة من التوصيل الحراري. بالمقارنة مع المواد الحرارية التقليدية، فهي تبدي الانتشارية الحرارية التي تزداد بزيادة درجة الحرارة. الشعيرات لها معامل انبعاث حوالي ٠,٩٥ مقارنة لأقل من ٠,٧ للحراريات التقليدية.

طاقتها الحرارية المنخفضة تعطي دورات تسخين وتبريد أسرع في الأفران التي تعمل لفترات. الشعيرات مقاومة كذلك للصدمة الحرارية. عند تسخين الشعيرات إلى حوالي ٩٨٠ °م. يبدأ عدم التزجيج (devitrification) والذي يسبب الانكماش، وفقد في القوة والكسر. عند ١٢٦٠ °م إلى ١٣١٥ °م فإن الانكماش يزداد سريعا أقصى انكماش طولي من ٢,٥ – ٣% بعد التسخين لمدة ٢٤ ساعة هو قيمة حقيقة لتصنيف درجة الحرارة. كمية الانكماش لها تأثير مباشر على الثبات الحراري.

الكثافة المنخفضة للشعيرات تساعد على استخدام الأحمال الإنشائية ذات الوزن الخفيف. وهي مقاومة إلى حد ما للصدمات الميكانيكية وللاهتزازات. مقاومة الاحتكاك لنسيج الشعيرات ضد الغازات يمكن تحسينه بالإنشاء المعياري (modular). تشبع السطح لبطانة الشعيرات بمادة تصلب ولحام (مثل silicasol) واستخدام طبقة حماية (الزنك أو الزركون) يحسن مقاومة البري.

أنواع منتجات الشعيرة:

يصنع العديد من المنتجات من الشعيرات مثل اللباد، غطاء، أشكال معدة بالتفريغ، ورق....الخ. اللباد أو الحصير عادة تلتصق في لفائف أو أفرخ مسطحة التي مثلها تمتلك قوة جيدة على البارد. تختلف الأغطية (blankets) عن اللباد لكونها غير عضوية تماما وتصنع بعملية اللصق الذاتي.

مميزات إنشائية الشعيرة خفيفة الوزن:

الفوائد الناتجة من تبطين الأفران بالشعيرة هي كالآتي:

- بطانة الشعيرات أخف في الوزن.
- بطانة الشعيرات تختزن حرارة أقل.
- يمكن استخدام منشأ من الصلب خفيف الوزن.
- انخفاض سمك الجدار يزيد من طاقة الفرن.
- تحسين التحكم في الفرن.
- دورات التسخين والتبريد قصيرة.

تقنيات إنشاء الشعيرة:

عموما، توجد ثلاث طرق لتبطين شعيرة السيراميك في الأفران وهي:

- ورق الحائط (wall papering)
- الإنشاء المعياري (modular)
- تلبيس بطبقة أو قشرة خارجية (veneering)

الإنشاء بطريقة ورق الحائط:

وهذه تشمل لحام دعائم معدنية قائمة (studs) أو ألواح تثبيت مع ألواح دعائم التقوية ثم يطـوق طبقات من شعر العزل فوق هذه الدعائم حتى الوصول إلى السمك المطلوب للعـازل. طـبقات الوجه الساخن يجب أن تكون إما منفردة أو متطابقة لمنع اختراق الغـازات الساخنة خلال الوصلات. يمكن استخدام عزل احتياطي (أو ساند) أقل تكلفة بهـذه الطريقة. مسامير التثبيت المعدنية لدرجة حرارة حتى ١٢٣٠ °م يتم لحامها مع الغـلاف المعدنـي للفـرن بفواصل ثابتة. بعد تطويق غطاء الشعيرات ، يتم تأمينها بواسـطة جوانات مسامير التثبيت. عند أعلى من ١٢٣٠ °م تستخدم مسامير التثبيت المعدنية. في أحد الأنظمة يتم لحام سبيكة الدعامة بغلاف الفرن مع قلوظة مسمار من السيراميك (corundum) فوق الدعامة المعدنية.

الإنشاء المعياري (Modular Construction)

الغطـــاء الحراري يتم تجهيزه المسبق في معايير ونماذج بمساحة ٣٠٥ مليمتر مربع والتـــي يمكــن بـــسهولة وبسرعة إنشائها في الموقع. توجد طرق مختلفة في تصنيع وتركيب هذه النماذج.

(١)-الكــتلة المتطابقة التي تتكون من غطاء من عدة طبقات مدمجة في عنصر واحد ٣٠٥ مليمتـــر × ٣٠٥ مليمتـــر وموضـــوعة في طبقة من المونة (الملاط). يتم لحام المعـــدن المـــتمدد فـــي الغطاء المعدني للفرن بعد عملية اللصق. النماذج يتم وضعها كإضافة. هذه الطريقة سهلة وغير مكلفة في الاستخدام وتوفر إمكانيات جيدة للإصلاح. يمكــن اســتخدامها في حالة الأشكال الهندسية المعقدة. وهي تعطي خفض في العزل الحـــراري عـــندما تكـــون الشعيرات عمودية على السطح الداخلي. وفي حالة الكتل المدمجـــة حـــيث تكـــون الشعيرات موازية لداخل الفرن. والتي تتكون كذلك من كتل ملفوفة، فإنها تعطي في هذه الحالة أقصى عزل حراري حيث تكون الشعيرات موازية لجدار الفرن.

التلبيس بطبقة أو قشرة خارجية (Veneering)

عـــند اســـتخدام هـــذه الطريقة فإن الشعيرات يمكن استخدامها فوق التبطين الحراري التقليدي الذي يكون في شكل جيد. وهذا يتضمن استخدام نماذج من سمك مصنوع من شـــرائط معلقة مع بعضها مع نسيج عضوي ذو فتحات. الأركان الأربع عبر النموذج هـــي غـــراء مـــصهور ساخن الذي يمسك النسيج مع بعضه. كلا من الغراء والنسيج يحترق عند بدء اشتعال الفرن. هذه النماذج يتم كلا من الغراء والنسيج يحترق عند بدء اشتعال الفرن. هذه النماذج يتم إنشائها باستخدام مونة يمكن أن تتطلب بالهواء.

تطبيقات شعيرات السيراميك:

شعيرات السيراميك هي حل اقتصادي وكفـــء لمشاكل العزل في الأفران حيث لا يوجد التصاق مباشر مع المعدن المنصهر.

بعض البيانات المفيدة الخاصة بالعزل بالحراري أو بشعيرات السيراميك موضحة في الجداول الآتية:

جـدول بـيانات حـرارية للحوائط بسمك ٣٥ سم حيث درجة حرارة الوجه الساخن ١٧٦٠ °م

نوع الحراريات	درجة حرارة الوجه البارد °م	المتوسط التقريبي لتدفق الحرارة كيلو كالوري/ متر مربع في الساعة
طفل حراري	٢٣٨	٤٠٧٠
٧٠% ألومينا	٢٤٩	٤٤٥٠
٩٠% ألومينا	٢٨٨	٥٨٣٠
سيليكا	٢٦٨	٤٩٦٠
كروم	٢٧٩	٢٣٧٠
ماجنيزيت	٣٥٢	٨٩٠٠
(forsterite)	٢٦٠	٤٦١٠

جدول تأثير شعيرة السيراميك على العزل:

البطانة الأصلية بالحراري	درجة حرارة التشغيل °م	سمك طبقة شعيرات السيراميك مليمتر	درجة حرارة الوجه البارد ° م	الفقد الحراري كيلو كالوري م² × الساعة	نسبة الخفض في الحرارة %	حفظ الحرارة كيلو كالوري م²	نسبة الخفض في الاحتفاظ بالحرارة %
الطوب الحراري الكثيف	٨٧٠	صفر	٩٥	٧٧٢	–	٩٣٠٢٣	–
٢٢٩ مليمتر		٥٠	٨٠	٥٦٠	٢٧,٥	٧٠٧٧٧	٢٣,٩
		٧٥	٧٤	٤٨٥	٣٧,٠	٦٢٧٤١	٣٢,٦
طوب العزل الحراري	١٠٩	صفر	١١٤	١٠٦٠	–	١٢٢٥٧٣	–
١١٤ مليمتر (١٠٩٣ °م)		٥٠	٩٨	٨١٠	٢٣,٦	٩٨٢٧٣	١٩٠٨
		٧٥	٩٢	٧١٨	٣٢,٣	٨٩٠١٨	٢٧,٤
المسبوكات العازلة	١٠٩٠	صفر	١٢٩	١٣٢٠	–	٣٦٣٥٧	–
٢٢٩ مليمتر (١٢٠٤ °م)		٥٠	١٠٨	٩٦٠	٢٧,٢	٢٩٨٩١	١٧,٨
		٧٥	١٠٠	٨٣٢	٣٦,٩	٢٧٣٠٦	٢٤,٩

الفصل الرابع

4

الحراريات الخاصة

Special Refractories

المواد الحرارية ذات الأسعار العالية تستخدم في صناعة البوتقة (crucible)، الأفران التجريبية وأغراض خاصة أخرى حيث وهذه تشمل الحراريات عالية النقاء (silicides, nitrides, borides, oxides) و (alundum) وهو خليط من الطفل والسيليكا المنصهرة، السيالونز (sialons) وهذه مجموعة مواد من (N – O – Al – Si) ، وحراريات السبك الكهربي، الخزف الفلذي (cermets)، السيليمانيت (sillimanite) ....الخ. ولكن بعض من هذه المواد لم يصبح عاديا بسبب قيود تصنيعها. الحراريات الخاصة تستخدم أساسا في الأفران المستخدمة في إنتاج المعادن النادرة والثمينة وكذلك تلك التي تعمل عند درجات الحرارة العالية جدا حيث لا يقبل أي تلوث للمعدن المنتج. بسبب التكلفة العالية لإنتاج الحراريات الخاصة (حيث تتطلب عمليات تصنيع خاصة ومواد عالية النقاء) فإن استخدامها في التطبيقات العادية غير وارد. فمثلا، محطات الطاقة النووية، التربينات الغازية، ومحركات الدفع النفاث التي تعمل في درجات الحرارة العالية تتطلب استخدام أكاسيد عالية النقاء لها قوة صلابة عالية ومقاومة عالية للتقشر.

زركونيا (ZrO_2) ، زركون (ZrO_4) ، كربيد السيليكون، Thoria (ThO_2)، Berellia (BeO)، الألومينا (Al_2O_2)، الماجنيزيا (MgO) ، السيليكا (SiO_2) وحراريات السبك الكهربي للموليت (mullite) ، الماجنيزيت وخليط من الماجنيزيا والبوكسيت والكروميت هي بعض من الحراريات الخاصة. مختصر عن هذه الحراريات الخاصة سيتم الإشارة إليه كالآتي:

الحراريات الفائقة (Super Reractories)

الأكاسيد عالية النقاء (ذات نقطة انصهار مرتفعة جدا) التي يمكن استخدامها ملتصقة مع المعدن المنصهر في ظروف الأكسدة تستخدم لعمل الحراريات الفائقة. يتم تحميص الأكاسيد النقية/ صهرها في أفران كهربية حيث يتم بعدئذ تبريدها ثم تكسيرها ثم طحنها إلى مسحوق ناعم. نظرا لأن الأكاسيد النقية تكون غير لدنة، فإنه يتم تشكيلها تحت ظروف الضغط العالي ودرجة الحرارة العالية. التشكيل يمكن كذلك عمله بواسطة السبك المنزلق (slip casting)، البثق، وكبس الضغط العالي أو الكبس على الساخن. المواد العضوية اللدنة تضاف أحيانا لإضافة اللدونة إلى المخلوط. أثناء الحرق تحت الظروف الجوية والحرارية المسيطر عليه، فإن المادة العضوية تحترق مع حدوث إعادة التبلر عند التسخين والذي يزيد كثيرا من كثافة المنتج الحراري.

الطوب الحراري من الأكاسيد عالية النقاء يكون عالي الكثافة ومقاوم لعدوانية الخبث. وهو خامل نسبيا لـــ N_2, H_2 ، النشادر والمجال ا لجوي الكربوني أو الكبرتي بجانب قوته الميكانيكية العالية والثبات عند درجة الحرارة العالية. أكاسيد ,(berellia) (zirconia), (thoria) للألومنيوم والمغنسيوم، السيليوم....الخ تقع تحت هذا التصنيف للحراريات. ثوريا (Thoria) التي هي مادة مشعة تنصهر عند أكبر من ٣٠٠٠ °م وتستخدم لعمل البوتقة المستخدمة في صهر بعض المعادن عالية النقاء. يستخدم (berellia) في صناعة بوتقات صهر الزركونيوم والبريليوم. الخ. وهو يستخدم كذلك في الأفران المقاومة للكربون كدروع إشعاعية. تستخدم الألومينا كمادة بري (abrasive) في قطع الصخور وفي الحفارات وفي تحميل الدحرجة الاسطوانية (roller)

عند درجات الحرارة العالية. وتستخدم كذلك في صناعة فيوزات الشرر، القياسات الحرارية، وفي الأنابيب الكهربية، قطع الأنف للصواريخ...الخ. يستخدم السيليكا النقية في عمل الأطباق، البوتقات، الأنابيب، وألواح المزدوج الحراري (thermo sheets) ....الخ. تستخدم المجنيزيا في صناعة بوتقات صهر البلاتين والنيكل. تستخدم الزركونيا في عمل بوتقات (لصهر أنواع خاصة من الزجاج والطلاءات الغير معدنية السيراميكية (glazes)، وفي صناعة المزدوج الحراري، أطراف المواقد....الخ. كما تستخدم في تبطين أفران السيراميك عالية درجة الحرارة كغطاء حامل للحرارة للمحركات النفاثة. حراريات الزركون تستخدم في حراريات صهر الألومنيوم والغلايات. الاستخدام الحجري (monoliths) للحراريات الفائقة يوفر زيادة في مقاومة التآكل والبري للبطانات بدون لصق وبذا يقلل تسرب الهواء والحرارة ويؤكد التحكم الأفضل في الجو. مونة الحراريات الفائقة، أسمنت الحراريات وخلطات (patch mixes) تستخدم في وضع الحراريات الفائقة وكذلك في صيانة البطانة التي بها تلف. استخدام الحجر المونوليث (monoliths) تقلل التكاليف الكلية بتجنب تصنيع واستخدام المهارات في وضع أشكال مكلفة خاصة.

حراريات كربيد السيليكون (Silicon Carbide)

الخواص الهامة لحراريات كربيد السيليكون (الذي يحتوي على أكبر من ٨٥% SiC) والذي يجعلها مناسبة للاستخدام في أشغال السيراميك، المعدن والعمليات الصناعية هي:

- توصيل حراري عالي ومقاومة حرارية عالية (يتحلل عند ٢٢٠٠ °م ولا ينصهر).
- المقاومة لتقشر الحرارة العالية وزيادة طاقة التحميل عند درجات الحرارة العالية.
- الخواص الميكانيكية الممتازة والكيماوية الخاملة وخاصة بالنسبة لسبخ

الحامض.

- الوزن الخفيف (الجاذبية النوعية الحقيقية = ٣,١).

هذه الحراريات تستخدم في فني محركات الصواريخ، قطع أنف الصواريخ، المقاومات الكهربية،

حراريات السيالون (Sialon Refractories)

منتجات السيراميك من مركبات الأكسيد والمونو أكسيد (Monoxide) التي تجمع الكثافة العالية والقوة العالية. المحلول الصلب (Solid Solution) من الألومينا في نيتريد السيليكون الذي اشتق منه هذا الاسم Si-Al-O-N – (Sialon) ، وهو مثال محدد لهذه المجموعة من مادة السيراميك. بسبب الخواص الضعيفة للتلبيد (Sialons)، الضغط على الساخن عند ضغط (18-30-MPa) ودرجة حرارة ١٧٠٠ – ١٧٦٠ °م في قوالب من الجرافيت ويتم للحصول على منتج كثيف منخفض المسامية. الضغط علىالساخن لخليط السيليكا والألومينيوم في جو من النيتروجين عند ١٤٠٠ °م.

السيالونز (sialons) له مقاومة جيدة للأكسدة وتأثير المعادن المنصهرة مثل الألومنيوم، الزنك، النحاس، الحديد والصلب. كذلك لا تتأثر بحامض الكبريتيك والهيدروليك والبوراكس والقلويات وبذلك تكون مناسبة لتعبئة ونقل تلك المواد.

السيرميت (Cermets)

السيرميت هي الجمع بين المعدن أو السبيكة ومادة غير معدنية مثل الأكسيد، الكربيد، النيترايد، البورايد. سيرميت تنتج من خليط السيراميك (مثل الأكاسيد، الكربيد، البورايد....الخ) والمعادن أو السبائك (سيراميك + معدن = سيرميت). السيرميت يجمع بين الخواص الجيدة لكل من السيراميك (الذي له قصافة وهشاشة، وله مقاومة منخفضة للصدمة الحرارية وقوة عالية عند درجات الحرارة العالية)، والمعادن أو السبائك (الذي له مرونة ولكن يفقد القوة عند التسخين). المواد السيراميك المستخدمة في إنتاج مادة السيرميت عادة أكاسيد عالية النقاء (مثل UO_2, ZrO, BeO, MgO, SiO_2,

Cr_2O_3, Al_2O_3 ....الخ)، أو الكربيدات عالية النقاء (مثل تلك للسيليكون، للتيتانيوم، TU ....الخ) أو Borides (مثل تلك للألومنيوم، للتيتانيوم، الزركونيوم....الخ). المجال المعدني المستخدم في إنتاج السيرميت يمكن أن يكون Mn, Ni, Fe, Co, Cr, Be, Al ، الصلب المقاوم...الخ.

للسيرميت ينتج بتشغيل مساحيق المجال السيراميكي والمجال المعدني إلى أشكال مدمجة بالضغط والتلبيد كما يتم في المسحوق الميتاليرجي. المجال المعدني يعمل كمادة ربط لحبيبات المجال السيراميك. القوة العالية ومقاومة درجات الحرارة العالية تجعلهم مناسبين للاستخدام في التطبيقات الخاصة جدا والحديثة مثل تلك في للصواريخ ومحطات الطاقة النووية.

الحراريات المصهورة كهربيا والمسبوكة

Fused and Electro cast Refractoies

تنتج الحراريات المنصهرة المسبوكة بصهر الخليط المطلوب للمواد الخام في فرن القوس الكهربي ثم تشكيل الشكل المطلوب في قوالب من الجرافيت في حوالي أسبوع من الزمن.

عند تلدين (Annealing) المنتج النهائي يتم للحصول على خواص أفضل ومتجانسة. الألومينات السيليكا، الألومينا – الزركونيا، الكروم – الألومينا والألومينا هي مواد خام عادية لإنتاج الحراريات المنصهرة المسبوكة.

الألومينا المصهورة المسبوكة تنتج بصهر الألومينا عالية النقاء (المحتوي على أكثر من ٩٩% Al_2O_3) أو البوكسيت عند ٢٠٠٠ °م. ولها قوة مقاومة حرارية عالية جدا، ومقاومة للاحتكاك، المقاومة الحرارية تحت الأحمال، والثبات الكيميائي والخمول في الظروف عالية الأكسدة أو الاختزال. وهي مستخدمة في تبطين المفاعلات من الكربون الأسود، قباب المفاعلات الكيميائية في مصانع الأسمدة، وفي مفاعلات إنتاج الغاز من البترول، والوحدات الخاصة الأخرى مثل غرف الحرق في إنتاج الأستيلين، وفي علميات التكسير باستخدام العامل الوسيط وإعادة التأهيل في

معامل تكرير البترول....الخ حيث تكون درجات الحرارة والضغط العالي وحالات الاختزال العالية (شاملة وجود الهيدروجين الساخن). حراريات السبك الكهربي للألومينا ٩٩% تستخدم في الأفران الدوارة، المحولات، مداخن الفرن العالية، غرف إزالة الغازات بالتفريغ لسبائك الصلب الخاصة وفي إنشاء المجمرة لفرن إعادة التسخين.

الزركونيا المسبوكة كهربيا، الماجنيزيت والكورندم تستخدم لعمل البوتقات لأفران الحث الفراغي لصهر السبائك الثمينة ذلك لأنها عالية المقاومة للمعادن المنصهرة. الزركونيا المسبوكة كهربيا من MgO, Cr_2O_3, Al_2O_3 (مع بعض من Fe_2O_3) له مسامية مفتوحة منخفضة (٠,٧ – ١,٨%)، وإجهاد كسر على البارد مرتفع (١٠٥٠ كجرام/ سم^2) ، ومقاومة حرارية عالية تحت التحميل (١٧٥٠ $^\circ$م تحت حمل ٢ كجرام/ سم^2). وهذه تستخدم في تبطين الأجزاء المعرضة للبلي في عدم وجود صدمة حرارية مقابل حزام الخبث، مجمرة أو قاع أفران التسخين المستمر المستخدم في مواد السلفيد (sulphide) الماجنيزيا المنصهرة زاد استخدامها حاليا في البوابات المنزلقة في إنتاج الصلب.

الفصل الخامس

5

المونة الأسمنتية الحرارية الكتل القابلة للانضغاط والسبك

Refractory Cement Mortars, Castables and Ramming Masse

المونة أو الأسمنت الحراري هي مواد ربط حرارية لها درجة حرارة انصهار مــرتفعة (مثل الماجنيزيت، الزركون، السيليكا، البوكسيت، الطفل الحراري، الكربون القاعدي) وتستخدم كمواد لصق لوضع الحراريات. يجب ، أن تكون قادرة على توفير ربــاط قــوي بــين الحــراريات ومقاومة أداء الفرن السائد مثل الحراريات الرئيسية المــستخدمة في الفرن. طبقا لاستخدامها سواء لوضع حراريات حامضية أو قلوية أو متعادلة فإن المونة الحرارية يجب اختيارها طبقا لذلك. بودرة الكوارتز المخلوطة مع حــامض الأكزاليك، عادة تنتج مونة مقاومة للحامض. المونة الجافة يتم تحويلها إلى الحالة العجينية بإضافة الماء قبل الاستخدام مباشرة. المونة يجب ألا تنكمش كثيرا عند التسخين وإلا فإنه ينتج عن ذلك تفكك وصلات الحراري.

المــونة الحــرارية لوضــع الطفل الحراري أو السيليكا الحرارية تنتج بخلط مــسحوق الحــراريات المستخدمة (سواء كانت قاعدية، أو طفل حراري، أو كوارتز

قلــوي أو سيليكا، كتل الرمل أو الكوارتز)، كيانيت (kyanite)، الطفل اللدن وإضافات. بالمثل المونة ذات الأساس من البوكسيت (المستخدمة لوضع الحراري عالي الألومينا) تنــتج بخلــط مــسحوق البوكــسيت والماجنيزيت، كسر الطوب الحراري، سيليكات الــصوديوم وإضــافات أخرى. المونة ذات الأساس من الجرافيت أو الكوك المحتوية على ٢٥% من الطفل الحراري تستخدم في وضع حراريات الكربون. أسمنت السيليكا (المــستخدم فــي وضــع حراريات السيليكا ينتج بخلط مسحوق كسر السيليكا والطفل الحــراري اللــدن حــيث عــند الخلط بالماء ينتج مادة زلقة جيدة. أسمنت المغنسيوم (المــستخدم فــي وضع حراريات المغنسيوم) ينتج بخلط الماجنيزيا البللورية، كلوريد المغنسيوم/ أو كبريتات المغنسيوم والماجنيزيا المحترقة قليلا. أسمنت الكروم المتعادل يمكــن اســتخدامه فــي وضع أي نوع من الحراريات. يمكن كذلك استخدامه كبديل لأســمنت الطفــل الحراري وعدم حدوث فواصل الانكماش حيث الوصلات السميكة يكون من الصعب تجنبها. المونة ذات الأساس من الزركون تستخدم لتبطين الحراريات الحامضية وذات الأساس من الزركون. الأسمنت الألوميني (المستخدم في وضع الطفل الحــراري، حراريات الألومينيوم عالية الأداء أو فائقة الأداء) تحتوي أساس ألومينات الكالــسيوم مع كميات مختلفة من SiO_2, Fe_2O_3. وهي تحتوي عادة على نسب متساوية من CaO, Al_2O_3 (حوالي ٤٠%) مع الحد الأقصى من SiO_2 (٣٣%) وأكسيد الحديدوز وأكسيد الحديديك. الأسمنت عالي الألومينا يحتوي على حتى ٧٠ – ٩٠ % ألومينا، ١ % SiO_2 ، وأكاســيد الحديــد. الأســمنت الألوميني (aluminous) يستخدم كذلك لتوفير غطاء رقيق للسطح الداخلي للحوائط التي تواجه درجات حرارة تشغيل مرتفعة.

رابــط الحراري (binder) يمكن أن يكون الهواء، الكيماويات، الشك الحراري (heat setting). الــشك بالهواء للمونة يسبب القوة عند الجفاف بسبب وجود سيليكات الصوديوم التي تضاف بأقل كمية بما يكفي لمجرد إحداث خواص الشك بالهواء لأنها تقلــل قدرة المقاومة الحرارية للمونة. الشك الحراري للمونة يسبب القوة عند التسخين فقط إلى درجة حرارة عالية عند حدوث غليان وترجيج. الإضافات الموجودة في معظم

المـــون/ الأســـمنت تسبب قوة شك على البارد في الحراري ورباط مستمر قوي يتم تكوينه عند تسخين المنشأ إلى درجة حرارة مرتفعة. أسمنت الشك الهوائي أفضل من أسمنت السيراميك بالشك الحراري يسبب الرباط الجيد القوي الذي يتكون مع استمرار التسخين عدا في حالة انخفاض القوة قريبا من نقطة الانصهار.

المسبوكات (Castables)

المسبوكات هي حراريات ليس لها شكل معين أحادي مثل الكتل المضغوطة. وهي خلـيط جـــاف هيدروليكي مكون من كسر الحراري مع مادة ربط مناسبة التي عند إضـــافة الماء لها تنتج كتلة تشبه الخرسانة المكونة للمسبوك المقيد. هذه المواد القابلة للــسبك والتـــي تسمى (castables) عليها طلب كبير. التسخين حتى درجات الحرارة العالـــية يحدث رباط سيراميكي في الأشكال المسبوكة. كسر الحراري (الذي لم يحدث لـــه تغيـــر بنائـــي عند التسخين) يستخدم في عمل المواد القابلة للسبك المشتملة على البوكـــسيت، كـــسر الطفـــل الحراري، السيليمانيت ومواد ألومينا أخرى أو كرومايت ....الـــخ. تستخدم المواد الحرارية القابلة للسبك في إنتاج مادة التبطين بجانب أعمال التـــرميم، استخدامها يعمل على تجنب التخزين والحفظ لعدد كبير من الأشكال المعقدة ويقلـــل مـــن عدد الوصلات في المنشأ بما يزيد من عمر طبقة البطانة وتقليل أعمال الـــصيانة. الحـــراريات التي ليس لها شكل محدد مثل (cstables) لها المميزات الآتية مقارنة بالحراريات ذات الشكل المحدد:

- تـــسهيل المنشآت بدون وصلات مع عدم وجود أضعف منطقة في المنشأ في وصلات الطوب.
- تحتاج إلى قليل من أعمال الجرد والحصر.
- يسهل إنشائها بما يقلل من التكاليف.
- سهولة عملية الإصلاح لمناطق البلي والاحتكاك للصيانة بما يحقق زيادة عمر الخدمة لبطانة/ منشأ الحراري.

يــتم خلــط هــذه المواد القابلة للسبك (castables) جيداً في الشكل الجاف قبل الاســتخدام لتجنب الفصل للحبيبات مختلفة الأحجام أثناء النقل. يوجد عمر محدد لهذه المواد لأن مادة الربط المستخدمة في هذه المنتجات تكون من نوع الشك الهيدروليكي. الخليط الميكانيكي (باستخدام خلاط المجداف - paddle mixer) لحبيبات الحراري الجافة مــع الماء تنتج منتج له إجهاد كسر على البارد مرتفع. زمن الخلط يكون من ٢ – ٣ دقيقة مع استخدام الكمية الصحيحة من الماء.

مادة (castable) التي تم خلطها بالماء يجب استخدامها خلال ١٠ – ١٥ دقيقة بعــد إضــافة المــاء إلــى الكاستابل الجاف لتجنب حدوث الشك الأولي. يمكن سبك الكاســتابل بالصب، أو بالتسوية (بالمسطرين) أو بالقذف بمدفع قذف (gunning) طبقا لمناســبة الغــرض. يمكن كذلك استخدامها بالدك والحشر، أو الكبس. استخدام الهزاز أثناء عملية الكبس يساعد في إزالة الهواء.

يجــب عدم حدوث أي فقد في المياه من خليط الكاستابل أثناء استخدامه حتى حــدوث الــشك نظــرا لأن قــوته تزداد بسبب التفاعل الكيميائي المنتج للحرارة بين الأسمنت عالي الألومينا الذي يحدث له الشك بالأداء الهيدروليكي والماء المستخدم أثناء الخلط مسببا ارتفاع في درجة الحرارة.

هيكل الحفظ المستخدم في وضع الكاستابل عادة يكون من الخشب بطلاء من الــزيت، البارافين أو غلاف معدني لتكون أدوات الحفظ مانعة لنفاذ المياه. يجب عدم وجــود أي مواد غريبة في هذا الغلاف. أثناء الإصلاح فإن سطح الحراري الموجود المــستخدم يجــب أن يكون غير ماص وذلك برش كمية كافية من الماء لتتشبع بطانة الحراري التي سيتم استخدام مادة الكاستابل عليها.

تــستخدم الأربطــة إما المعدنية (سبيكة الصلب) أو الحرارية لتحمل الحرارة والظــروف الأخرى في مكان الاستخدام العملي للكاستابل. يجب ألا يتم جفاف سطح الكاســتابل خــلال الأربع وعشرين ساعة الأولى بعد الإنشاء (بالرش المنتظم للماء) ولــيس سريعا خلال الساعات التالية. سطح طبقة الكاستابل يجب عدم تشطيبه إلى حد

النعومة. يتم توفير ثقوب صغيرة في المنادة لتسهيل الجفاف من داخل سمك الطبقة. رغم أن الجفاف التام يستحيل عند درجة الحرارة العادية، فإن الجفاف يتم عند التسخين الأولي عند معدل بطئ. يتم التسخين الأولي لطبقة البطانة من الكاستابل بمعدل ٣٠ °م في الساعة. تستمر درجة الحرارة عند ١١٠ °م لمدة نصف ساعة لكل سمك قدرة ٢٥ مليمتر من طبقة الكاستابل. عندئذ يتم رفع درجة الحرارة بمعدل ٥٠ – ٦٠ °م في الساعة ثم الاستمرار عند درجة حرارة ٢٢٠ °م لمدة نصف ساعة. يمكن استمرار الحرارة عند ٥٠٠ – ١٠٠ °م عند اللزوم. أخيرا يكون معدل التسخين بمعدل ١٠٠ °م كل ساعة أعلى من ١٠٠٠ °م حتى درجة حرارة التشغيل. يحدث للكاستابل خفض كبير في القوة في مجال درجة حرارة ما بين ٦٠٠ – ١١٠٠ °م والذي يمكن مراجعته والذي يمكن إيقاف حدوثه بإضافة شعيرات الصلب المقاوم (بقطر ٠,١٢٥ – ١,٥ مليمتر، وبطول ٥ – ٧٥ مليمتر) في خليط الكاستابل إلى ما قدره ٣% من الحجم. الهبوط في القوة عند حوالي ٧٠٠ – ٨٠٠ °م يمكن كذلك منع حدوثه باستخدام مسحوق فوسفات الألومينيوم حتى ٥% إما منفصلا أو مع الأسمنت العالي الألومينا بالشك الهيدروليكي (SETTING). طبقا لخواص التمدد والانكماش للكاستابل عند درجة حرارة التشغيل يتم توفير الإمكانيات الخاصة بالتمدد والانكماش. يتم توفير وصلات التمدد بإدخال مواد قابلة للاشتعال مثل الخشب، الورق المقوى، ألواح البلاستيك...الخ. على مراحل مختلفة. بالمثل يتم ترك فتحات محددة (والتي تسمى CUT-Joints-) عند مراحل محددة لضبط الانكماش للكاستابل.

حراريات البلاستيك:

حراريات البلاستيك تحفظ في عبوات مانعة للرطوبة حيث يتم إخراجها من العبوة قبل الاستخدام مباشرة. وهذه تتوفر دائما في شكل كتلة رطبة ليست مثل المسحوق الجاف للكاستابل. عادة لا تتم الحاجة إلى إضافة ماء في أثناء الاستخدام. حجم الكتلة يتم اختياره عادة بحيث تكون طبقة الكتلة الواحدة هي السمك الكلي للبطانة

المطلوب استخدامها. كتل الحراريات البلاستيك يتم وضعها إما بالطريقة اليدوية بالدك أو بالكبس الهوائي. كما في حالة الكاستابل تستخدم أدوات التثبيت (anchors) (من المفضل أن تكون من الحراريات) في تثبيت حراريات البلاستيك كذلك. حراريات البلاستيك لها مقاومة عالية للاحتكاك وتستخدم في الأماكن حيث يمكن عمل الدمك تقليديا وحيث يكون الصلب أو التسوية يصعب تنفيذها. لتسهيل الجفاف فإنه لا يتم تنعيم السطح المعرض للعمل مع اتخاذ الإجراءات المشابهة لتلك للكاستابل أثناء عمليات التسخين والتجفيف.

المراجع

1. American Pertolium Institute, Classification of Fuels for Different Purposes. National Conference for for Fuel Engineering – 1995 Ocland-Cal.f.
2. Refoming of Gasoline for Environmental Protection API Conference in 1985 Calif-June 1985.
3. Hand Book of Furnaces.S.S.Dara. in 2004 University of Nagpur India – 2004

Hand Book of Refractories by O.P.CUPTA Khanna Publishers. Fourth Edition 1998 New Delhi India.


المحتويات

الباب الأول : الوقود

الباب الثاني : الأفران Furnaces

الباب الثالث: الحراريات Refractories

ف : 20 تاريخ استلام : 23/8/2007



Fuels..Furnaces..Refractories ..

• الوقود
• الأفران • الحراريات

تناول هـذا الكتاب موضوعات الوقود والأفـران والحراريات وذلك لما لهذه الموضوعـات الثلاث من أهمية بالغة فى جميع العمليات الصناعية والتنموية وخاصة فى عمليات الصناعات المعدنية والغلايات التى تجمع بين هذه الموضوعات الثلاث.

وتم اعداد هذا الكتاب فى ثلاث أبواب :

حيـث شمل البـاب الأول علـى أنـواع الوقود واسـتخداماته الصلب والسائل والغاز

وأما الباب الثاني تم تناول انواع الأفران المختلفة مع التركيز على عملية ترشيد الطاقة سواء بالنسبة لتصميم الأفران أو استعمالاتها

وأخـيرا البـاب الثالـث فقد تم فيـه دراسـات تفصيلية عن أنواع الحراريات من المواد الخزفية والمعدنية والغير معدنية وخصائصهـا واسـتعمالاتها . ويعتبر هذا الإصـدار إضافة إلى المكتبة العربية يستفاد به فى تلك المجالات.

والله الموفق

الناشر

الغلاف : جمال خليفة

ISBN 977-287-686-8
9 789772 876860

دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع
٥٠ شارع الشيخ ريحان - عابدين- القاهرة
☎ ٧٩٥٤٢٢٩
www.sbh-egypt.com
e-mail : sbh@link.net